

**Universidad Politécnica de Madrid**  
**Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE  
PERFILES TUBULARES DE ACERO UTILIZADOS EN  
PROTECCIONES COLECTIVAS Y MEDIOS AUXILIARES  
DE EDIFICACIÓN”**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Sara Martín López**

2011



**Universidad Politécnica de Madrid**  
**Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**

**Máster Universitario en Innovación Tecnológica en Edificación**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE PERFILES  
TUBULARES DE ACERO UTILIZADOS EN PROTECCIONES  
COLECTIVAS Y MEDIOS AUXILIARES DE EDIFICACIÓN”**

Autor

**Sara Martín López**

Arquitecto Técnico

Director/a o Directores/as

**Alfonso Cobo Escamilla**

Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arquitecto Técnico

**María de las Nieves González García**

Dra. Por la Universidad Politécnica de Madrid, Arquitecto Técnico

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2011



## **Agradecimientos**

El mayor agradecimiento se lo debo a mis directores en el Máster Universitario en Innovación Tecnológica en Edificación, al que pertenezco, al Dr. Alfonso Cobo Escamilla y a la Dra. María de las Nieves González García por su desinteresada ayuda, orientación, paciencia y comprensión que me han acompañado directamente desde el inicio de esta campaña experimental, ya que sin ellos este trabajo no hubiera sido posible. Gracias por brindarme esta oportunidad.

No quiero olvidarme de agradecer permitirme el uso de las instalaciones pertenecientes al Laboratorio de materiales de Construcción de la EUATM, especialmente al Dr. Mariano González Cortina responsable del laboratorio y al técnico del laboratorio D. Santiago Villa Ortega por su ayuda inestimable.

También quiero mencionar a D. Eustaquio Fernández del Olmo y a D. Francisco Javier López-Asiaín profesores de esta escuela por su recomendación para realizar este máster, ya que sin ella no hubiera podido estar hoy aquí.

“A mis padres, a mi hermano Victor y mi familia.

A Jose.”

## **Resumen**

Habitualmente se utilizan perfiles tubulares de acero en los elementos que componen las protecciones colectivas (PC) y los medios auxiliares de edificación (MAE).

La evaluación analítica de PC y MAE exige conocer el comportamiento de los elementos que forman estas estructuras.

Tanto el Eurocódigo 3 (EC3) como el Código Técnico de la Edificación (CTE) establecen una clasificación de secciones basada en su esbeltez. La clase de sección indica el tipo de análisis a utilizar y las posibilidades de plastificar de la sección en orden a su dimensionamiento.

La mayoría de los perfiles tubulares empleados en PC y MAE son de secciones de acero clase 1, lo que supone la posibilidad de desarrollarse una rótula plástica y el empleo de métodos de análisis plástico para la evaluación de los elementos.

En este trabajo se muestran los resultados experimentales obtenidos sobre perfiles tubulares de acero de sección circular y cuadrada cuando se ensayan a flexión en tres puntos, usando como variables la esbeltez de la pieza ensayada y la velocidad de carga.

Los resultados de los ensayos a flexión realizados con perfiles tubulares fabricados con secciones clasificadas como clase 1 según EC3 o CTE, demuestra que los elementos ensayados no tienen la posibilidad de desarrollar una rótula plástica, porque después de alcanzar la carga máxima se produce su abollamiento, lo que motiva el colapso.

Se concluye que los resultados obtenidos permiten afirmar que la clasificación de secciones indicada por EC3 o CTE para perfiles tubulares de acero queda del lado de la inseguridad porque predice comportamientos plásticos en secciones que no tienen posibilidad de plastificación.

### **Palabras clave**

Perfiles tubulares de acero, flexión, plasticidad, elasticidad, seguridad, edificación.



## **Abstract**

### **Study on bending behaviour of steel tubular profiles used in collective protection and auxiliary fields**

Using steel tubular profiles as collective protection and auxiliary fields is a common practise in Spain. The analytical evaluation of collective protection and auxiliary fields requires understanding the behaviour of the elements used to build up these structures.

Both the Eurocode 3 (EC3) and the Building Code (Código Técnico de la Edificación, CTE) specifies the different methods used to test slender sections. The class section indicates the type of analysis used and the possibility of plasticizing the section in order to sizing.

Most tubular profiles used in collective protection and auxiliary fields are class 1 steel sections, which involves the possibility of developing a plastic hinge and the use of plastic analysis methods for the assessment of the profiles.

This work shows the experimental results obtained on hollow steel circular and squared sections when tested in three-point bending experiments using as variables the slenderness of the test piece and speed.

According to the results shown, when the bending class 1 (classified according to Eurocode 3 or Building Code) tubular section elements tested did not reach up to a plastic hinge, because dent appears before bearing that maximum load , which motivates the collapse of the element.

As a conclusion from the studies the analysis confirms that the classification indicated by Eurocode 3 or Technical Building Code for tubular steel sections is not totally reliable because it predicts plastic behaviour on sections that have no possibility of plasticizing.

## **Keywords**

Steel tubular profile, bending, plasticity, elasticity, safety, construction.



## Índice general

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	iii
Palabras clave .....	iv
Abstract.....	v
Keywords .....	vi
Índice general.....	ix
Introducción.....	xiii
Metodología.....	xv
1 Estado actual de los conocimientos.....	1
1.1 Introducción: Perfiles tubulares de acero .....	1
1.1.1 Historia y fabricación.....	3
1.1.1.1 Historia .....	3
1.1.1.2 Fabricación .....	6
1.1.1.2.1 Conformado en frío .....	6
1.1.1.2.2 Conformado en caliente.....	7
1.1.2 Simbología y normativa .....	8
1.1.2.1 Simbología.....	8
1.1.2.2 Normativa.....	9
1.1.3 Propiedades mecánicas de perfiles tubulares de acero.....	14
1.1.4 Dimensionamiento a flexión.....	16
1.1.4.1 Clasificación de las secciones.....	17
1.1.4.2 Cálculo en elasticidad .....	19
1.1.4.3 Cálculo en plasticidad .....	20
1.1.4.3.1 Cargas de plastificación.....	21
1.2 Aplicaciones en protecciones colectivas de los perfiles tubulares .....	23

1.2.1	Introducción .....	23
1.2.2	Sistemas de protección de borde.....	23
1.2.2.1	Barandillas como sistema de protección de borde.....	25
1.2.2.2	Sistema tipo horca.....	26
1.2.2.3	Sistema de bandejas.....	27
1.2.2.4	Plataformas de descarga de materiales .....	30
1.3	Medios auxiliares en edificación.....	33
1.3.1	Introducción: Andamios .....	33
1.3.2	Andamios metálicos tubulares.....	35
1.3.2.1	Comprobación de estabilidad de los andamios fijos y móviles tubulares .....	37
1.3.3	Andamios de borriquetas.....	37
1.3.4	Andamios colgados .....	38
1.3.5	Andamios móviles .....	39
1.4	Estudios realizados acerca del comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero.....	41
1.4.1	Ensayos sobre postes pertenecientes a sistemas provisionales de protección de borde.....	41
1.4.1.1	Resultados generales .....	43
1.4.1.2	Conclusiones .....	44
1.4.2	Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable .....	45
1.4.2.1	Resultados generales .....	46
1.4.2.2	Conclusiones .....	48
2	Objetivos .....	49
3	Materiales empleados y técnicas empleadas .....	50
4	Trabajo experimental y analítico realizado .....	54
4.1	Trabajo experimental realizado .....	54
4.1.1	Diseño de los ensayos.....	54
4.1.1.1	Predimensionamiento .....	54
4.1.1.2	Apoyo sobre la prensa.....	55
4.1.1.3	Método de ensayo .....	55

4.2	Trabajo analítico realizado .....	57
4.2.1	Clasificación de las secciones.....	59
4.2.2	Métodos de cálculo de Momento último .....	60
4.2.3	Cálculo de la flecha .....	61
4.2.4	Cálculo de Inercias.....	62
4.2.5	Ductilidad: Cálculo de energía por deformación.....	62
5	Resultados obtenidos .....	64
5.1	Resultados experimentales.....	64
5.2	Obtención analítica.....	70
5.2.1	Cálculo de momentos últimos.....	71
6	Análisis de los resultados.....	74
6.1	Comportamiento general.....	74
6.2	Influencia de la velocidad de carga .....	76
6.3	Influencia de la luz entre apoyos.....	77
6.3.1	Luz de 1000 mm .....	77
6.3.2	Luz de 400 mm .....	79
6.3.3	Luz de 200 mm .....	80
6.4	Influencia del envejecimiento.....	80
	CONCLUSIONES.....	83
	POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	84
7	Bibliografía.....	85
8	Anexos .....	91
8.1	Anexo 1: Estudio de las soldaduras .....	91
8.2	Anexo 2: Clasificación de las secciones.....	98
8.3	Anexo 3: Resultados carga-desplazamiento.....	103
8.4	Anexo 4: Diagramas carga-desplazamiento .....	104
8.4.1	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 1000 mm y perfiles adquiridos .....	104
8.4.2	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 400 mm y perfiles adquiridos .....	107

8.4.3	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 200 mm y perfiles adquiridos .....	111
8.4.4	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 1000 mm y perfiles expuestos a la intemperie .....	114
8.4.5	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 400 mm y perfiles expuestos a la intemperie .....	115
8.4.6	Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 200 mm y perfiles expuestos a la intemperie .....	116
8.5	Anexo 5: Resultados obtenidos y cálculos de energías .....	117
8.5.1	Cálculos de energías en perfiles adquiridos .....	117
8.5.2	Cálculos de energías en perfiles conservados a la intemperie .....	120
8.6	Anexo 6: Resultados de flechas y momentos últimos .....	122
8.6.1	Resultados de flechas y momentos últimos en perfiles adquiridos .....	122
8.6.2	Resultados de flechas y momentos últimos en perfiles conservados a la intemperie .....	125
8.7	Anexo 7: Comparación de porcentajes de diferencias en momentos últimos .....	127

## **Introducción**

Los perfiles tubulares de acero son perfiles que demuestran tener grandes ventajas que hacen que en muchos casos sea el material más idóneo frente a otros materiales e incluso frente a otros tipos de perfiles metálicos. Por ello, la gran mayoría de las protecciones colectivas y medios auxiliares en edificación incorporan entre sus sistemas elementos fabricados a base de perfiles tubulares de acero.

Estos perfiles al ser usados en ámbitos de seguridad en edificación, adquieren una importancia tal que motiva el estudio de la fiabilidad de su comportamiento mecánico.

Para estudiar el comportamiento de secciones a base de perfiles tubulares, se han realizado ensayos a flexión sobre distintos tipos de perfiles tubulares circulares y cuadrados de acero, con las mismas características que los habitualmente empleados para su uso en protecciones colectivas y medios auxiliares.

El esquema de solicitaciones y tensiones resultante del ensayo de flexión es muy similar en la mayoría de los casos a los esquemas de solicitaciones y tensiones reales. En este caso, la sección más desfavorable está solicitada por el máximo momento flector y el máximo cortante y la variación del flector a lo largo de las barras es lineal.



Documentos técnicos con el CTE-SE-A o el EC3, establecen una clasificación para determinar el modo de cálculo de las distintas secciones de acero, en la que la mayoría de las secciones pertenecientes a los perfiles tubulares de acero son de la clase 1.

La clase 1 es aquella que permite la formación de una rótula plástica que tiene una capacidad de rotación suficiente para la redistribución de los momentos, con lo que según los documentos técnicos se permite que se utilice el cálculo plástico o el elástico para la determinación de las solicitaciones.

Esta clasificación indica directamente la capacidad de aprovechamiento de la sección antes de que se produzca la abolladura y depende de las dimensiones de las secciones de los perfiles tubulares de acero. Estudios anteriores (1) desvelan que los elementos no llegan a plastificarse porque antes de este fenómeno se abollan, lo que motiva el colapso.

En base a lo anterior, en este trabajo se pretende realizar un análisis de distintas secciones de perfiles tubulares de acero para estudiar su comportamiento a flexión.

## **Metodología**

En primer lugar y con el objetivo de entender el comportamiento de los perfiles tubulares de acero como material constructivo empleado en edificación, se ha realizado una amplia búsqueda bibliográfica cuyo resultado se muestra en el capítulo 1.

En este capítulo se presenta una evolución histórica del conocimiento de los perfiles tubulares de acero, así como un recorrido por sus métodos de fabricación y normativa más relevante en el uso de los perfiles tubulares de acero. Más adelante se incide en las propiedades mecánicas del material y se concluye con los conceptos básicos que incluyen el CTE y EC3, referentes al comportamiento a flexión.

A partir del apartado 1.2 y hasta el final del estado actual de los conocimientos, se realiza una recopilación de las principales protecciones colectivas y medios auxiliares que incorporan perfiles tubulares de acero entre sus elementos, así como la principal normativa y secciones habitualmente utilizadas. Para concluir se recogen los principales estudios realizados en el campo del comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero. En el capítulo 2 se relatan los objetivos que han provocado la realización de este trabajo.

El capítulo 3 y 4 están dedicados al trabajo experimental realizado en el laboratorio de materiales de construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid (EUATM). El método consistió en el ensayo a flexión de 144 secciones tubulares circulares y rectangulares de acero, en los que para ello se emplearon 36 perfiles tubulares de acero adquiridos por la EUATM y 12 perfiles tubulares expuestos a la intemperie que fueron ensayados en 3 puntos. En el capítulo 4 se enumeran los principales métodos de cálculo

tanto en elasticidad como en plasticidad aplicados para cada perfil tubular de acero.

En el capítulo 5 se incluyen los resultados experimentales obtenidos en los ensayos a flexión y los cálculos analíticos realizados durante el desarrollo de este trabajo.

El capítulo 6 es un análisis entre los resultados obtenidos en el trabajo experimental obtenido y el analítico calculado y el estudio de sus posibles diferencias.

Por último se muestran las principales conclusiones derivadas de los estudios realizados durante el desarrollo de este trabajo. Así mismo se exponen, como posible continuación de este trabajo, futuras líneas de investigación en el campo de los perfiles tubulares de acero.

Este trabajo incluye 7 anexos en los que se recogen los resultados más interesantes obtenidos durante la realización de los ensayos, además de los principales cálculos realizados en este trabajo recogido en forma de tablas.

## **1 Estado actual de los conocimientos**

### **1.1 Introducción: Perfiles tubulares de acero**

Por múltiples ventajas y rapidez de construcción, durabilidad y bajo costo, el acero es cada día más utilizado en edificaciones de diversos estilos. Los perfiles tubulares de acero son perfiles fabricados con una sección geométrica sencilla (cuadrada, rectangular o circular) con una longitud determinada y dimensiones, controlando su espesor y fabricados a base de acero (2).

La selección de un perfil en particular en una estructura de acero está controlada por muchos factores como: comparación de ventajas y desventajas con respecto a las propiedades mecánicas, costes unitarios del material y de fabricación, montaje y mantenimiento. La experiencia de los proyectistas y fabricantes interviene también en esta selección. Existen dos tipos de clasificaciones de perfiles tubulares de acero:

- Para uso general
- Para uso estructural

La fundamental diferencia entre ambos tipos de perfiles tubulares es que el control en la fabricación de perfiles para uso estructural es mucho más exigente que para uso general en los que solo se asegura un rango de composición química mínimo y máximo, dando como resultado una excelente soldabilidad y doblabilidad en caso de requerirse. El tipo de perfiles que es objeto de este estudio esta indicado para uso general.

Para los perfiles de uso estructural debido a la función que van a cumplir, se utiliza acero estructural soldable, el cual garantiza cifras mecánicas para la resistencia a la tracción, límite de fluencia, y alargamiento, además de valores de composición química máximos, lo cual da como resultado una

excelente soldabilidad y doblabilidad en caso de ser necesarios. En la tabla 1.1.1 se muestran los principales usos de los perfiles tubulares en general (3).

Tabla 1.1.1 Principales Usos de los perfiles tubulares de acero.

CUADRADOS Y RECTÁNGULOS	TUBOS REDONDOS
Rejas y protecciones Estructuras y Postes Señales viales Barandillas Pasarelas	Muebles Bicicletas Señales viales Andamios Estructuras



Figura 1.1.1 Forma tubular del bambú

Los perfiles tubulares de acero surgieron de la propia observación de la naturaleza (2). Como ejemplo cabe mencionar el bambú (4) y las cañas que demuestran que la forma tubular es la mejor preparada para resistir los esfuerzos de compresión, torsión y flexión en los diferentes ejes. En la figura 1.1.1 se puede apreciar la forma tubular que presenta el bambú.

El perfil tubular combina estas extraordinarias características con una forma arquitectónicamente atractiva. Además de esto, la forma cerrada sin ángulos vivos reduce el área a proteger y dilata la vida útil de la protección frente a la corrosión.

Otra de las características particularmente ventajosas de la sección tubular es su bajo coeficiente de resistencia aerodinámica frente a cargas de viento, agua y oleaje.

El hueco interno de los perfiles (5) puede utilizarse de varias formas, por ejemplo para aumentar la resistencia portante rellenándolo con hormigón o rellenándolo de agua para suministrar protección contra el fuego. Además de esto, en el hueco interno de los perfiles pueden incorporarse instalaciones como sistemas de ventilación o de calefacción.

Una de las principales desventajas es que el coste unitario de los perfiles tubulares de acero es más elevado que en otro tipo de perfiles, aunque en determinados casos que se necesiten especialmente las ventajas que aportan los perfiles tubulares su utilización puede suponer un gran ahorro económico.

Una de las limitaciones iniciales para la aplicación de perfiles tubulares era el diseño de los nudos. Hoy en día están a nuestra disposición multitud de guías para el diseño de nudos fruto de minuciosas investigaciones. (6)

### **1.1.1 Historia y fabricación**

#### **1.1.1.1 Historia**

Aunque el hierro sea conocido desde la Antigüedad (7) (8) la forma tubular se ha empleado inicialmente para la fabricación de cañones y armas de fuego. En 1784 el ingeniero James Watt (9) utilizó por primera vez tubos de fundición de hierro para construir el antepasado de la máquina de vapor.

En 1815, William Murdoch (10) diseñó el roscado llamado "rosca gas" para empalmar tubos y con ello realizó canalizaciones de agua o de gas.

En 1825, Cornelius Withehouse (11) fabrica tubos soldados por contacto (método a la cloche) que permite la conformación y la soldadura metalúrgica de l tubo a partir de una banda de chapa.

En 1845, Albert Poensgen crea una fábrica de producción importante para la época. En 1854 Bessemer (12) puso a punto el primer proceso de elaboración industrial de acero.

En 1871, August Thyssen funda la fábrica "Mulheim" para fabricar tubos soldados. Sin embargo, no se impulsó el uso de los perfiles hasta 1886 cuando los hermanos Max y Reinhardt Mannesmann pusieron a punto el "mandril oblicuo" que permitió fabricar tubos sin soldadura y en cantidad. Poco después perfeccionaron el laminador "a paso de peregrino" que perfeccionaba el

desbaste que realizaba el mandril oblicuo. Con el tiempo, Cari Stiefel, ingeniero suizo desarrolló el proceso de laminación automática del desbaste que hoy en día sigue llevando su nombre.

En 1886 los hermanos Max y Reinhardt Mannesmann lograron desarrollar los métodos para producir perfiles circulares soldados y sin soldadura con paredes de menor grosor y mayor longitud mediante el proceso de punzonado (13) con rodillo oblicuo (figura 1.1.2) (método que se combinó con el sistema Pilger, como se muestra en la figura 1.1.3).

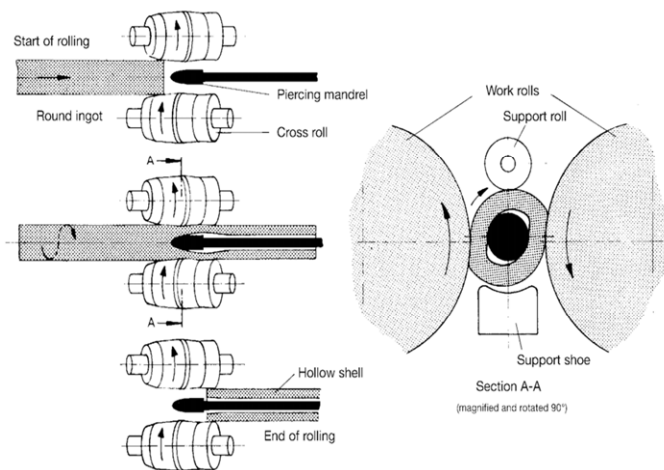


Figura 1.1.2 Proceso de punzonado con rodillos oblicuos

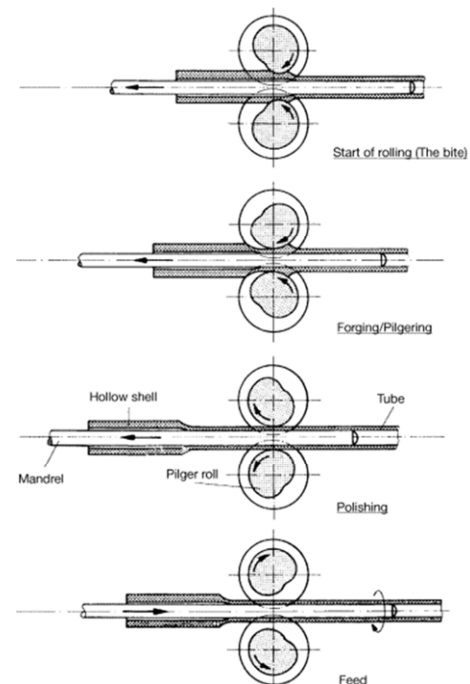


Figura 1.1.3 Proceso Pilger

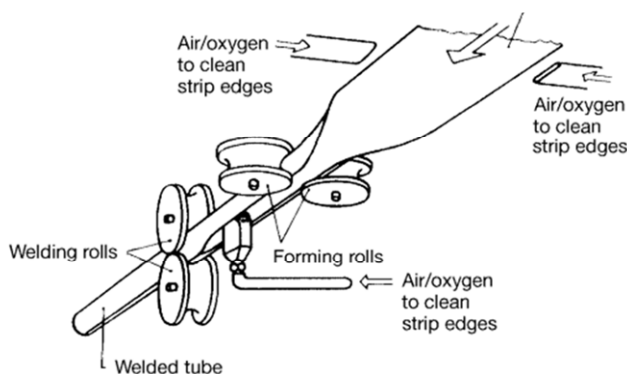
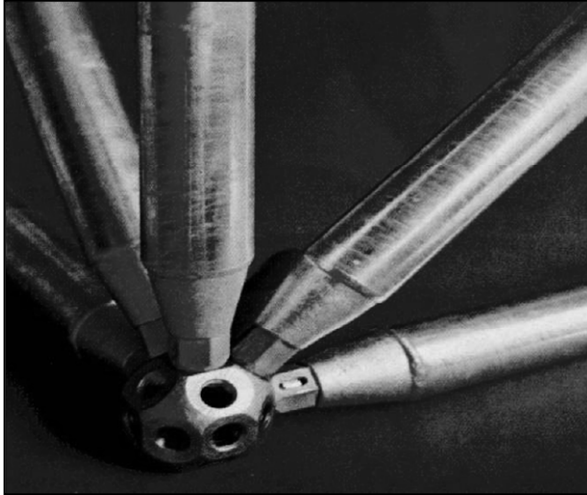


Figura 1.1.4 Proceso Fretz Moon

Durante la primera mitad del siglo XX, Cornelius Witehouse (11) desarrolló la soldadura por fusión de perfiles tubulares circulares y la soldadura continua la inventó Fretz Moon (Figura 1.1.4) en 1930. Para el solape de varios

perfiles tubulares de acero Müller desarrolló una máquina especial para ello.

Otro de los principales problemas ante los que se encontraban los principales ingenieros de la época era el diseño de los nudos, hasta que en 1937 surge el sistema Mero (figura 1.1.5) inventado por Mengerinhausen que supuso la capacidad de poder construir grandes estructuras espaciales con perfiles tubulares de acero.



**Figura 1.1.5 Conector Mero**

En 1952 Stewarts and Lloyds desarrollaron el perfil tubular rectangular. Este perfil permite realizar las conexiones mediante cortes planos. A partir de 1950 empiezan a surgir manuales para el diseño de uniones con perfiles tubulares de acero, y para ello se realizan exhaustivas investigaciones.

Como ejemplo de puente realizado con elementos tubulares de acero es el Firth of Forth Bridge en Escocia (figura 1.1.6) y data de 1890 con una luz libre de 521 m de altura (14). Este puente se construyó a base de elementos tubulares fabricados con chapas laminadas remachadas, ya que en esa época no se disponía de una tecnología mejor.



**Figura 1.1.6 Puente Firth of Forth Bridge en Escocia**



### 1.1.1.2 Fabricación

El tubo de acero se presenta bajo la forma (15) de un perfil geométrico simple con dimensiones y espesores determinados, con aceros de composición química y de calidades diferentes, según los diversos métodos de fabricación elegidos.

Los tubos de acero de forma circular se fabrican, bien a partir de un producto macizo (los tubos sin soldadura), bien a partir de un producto plano (los tubos soldados). Para la fabricación de perfiles tubulares cuadrados o rectangulares los fabricantes juntan dos U en chapa plegada por medio de soldaduras longitudinales, o proceden al perfilado de una chapa que llevan directamente a la forma requerida, y que sueldan en el centro de una de las caras del perfil. Las operaciones de conformación se efectúan en caliente o en frío (Los perfiles que son el ámbito de estudio de este trabajo son conformados en frío):

#### 1.1.1.2.1 Conformado en frío

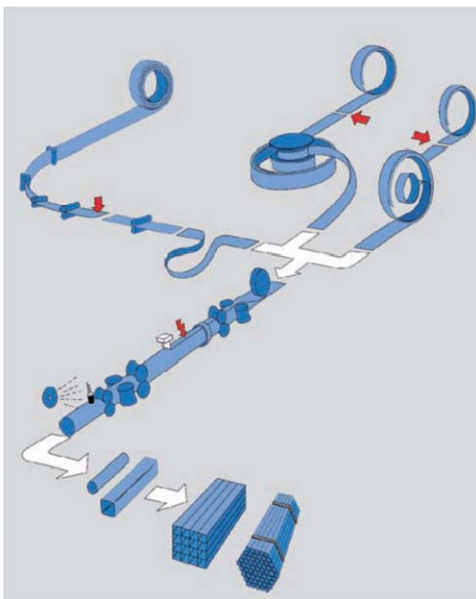


Figura 1.1.7 Proceso de laminado en frío

Los Perfiles Tubulares de acero fabricados mediante este proceso (16) (17) están regulados por la norma UNE-EN 10219. Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro y parte 2: Tolerancias, dimensiones y propiedades de sección.

Cuando un metal es extruido o estirado a una temperatura debajo de la recristalización el metal es trabajado en frío. La mayoría de los metales se

trabajan en frío a temperatura ambiente, pero durante el proceso de conformado se produce un aumento de temperatura por fricción entre el equipo y la pieza pudiendo llegar a alcanzar 200 °C. El trabajo en frío distorsiona el grano y reduce un poco su tamaño, mejora la resistencia, la maquinabilidad, exactitud dimensional, consigue una menor oxidación y mejor terminación superficial del metal. Como contrapartida para su conformación en frío se requieren presiones mucho mayores que en el caso de la conformación en caliente. En la figura 1.1.7 se muestra el proceso de conformación en frío mediante un esquema y en la figura 1.1.8 se muestra una imagen de un perfil tubular en pleno proceso de conformación en frío.



Figura 1.1.8 Perfil tubular laminado en frío

Los estudios comprueban (estudios realizados por Chajes, Britvec, Winter, Karren y Uribe en la Universidad de Cornell en la década de 1960) que las propiedades mecánicas del acero son modificadas por el conformado en frío, en especial la tensión de fluencia, la resistencia a la tracción, y el alargamiento (18).

#### 1.1.1.2.2 Conformado en caliente

Proceso donde el conformado principal de los perfiles huecos para la construcción se efectúa en caliente, en un rango determinado de temperaturas. Los Perfiles Tubulares de acero fabricados mediante este proceso están regulados por la norma UNE-EN 10210. Perfiles huecos para construcción acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones Técnicas de suministro; Parte 2: Tolerancias, dimensiones y propiedades de sección (19) (20). En la tabla 1.1.2 se muestra las principales ventajas y desventajas del proceso de conformación en caliente. En la figura 1.1.9 y en la

figura 1.1.10 se muestran las imágenes del proceso de conformación en caliente en perfiles tubulares.

Tabla 1.1.2 Ventajas y desventajas del proceso de conformado en caliente

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No aumenta la dureza o ductilidad del metal	Rápida oxidación
El metal se hace más tenaz	Mal acabado superficial
Se requiere menor fuerza y por lo tanto menor tiempo, ya que el material es más maleable.	
Facilidad para empujar el metal a formas extremas cuando esta caliente	No se pueden mantener tolerancias estrechas
Se eliminan zonas de baja resistencia.	
Se eliminan los poros debido a las altas presiones de trabajo	Requieren herramientas resistentes al calor que son relativamente costosas
El material tiene buena soldabilidad y maquinabilidad	



Figura 1.1.9 Perfil tubular conformado en caliente

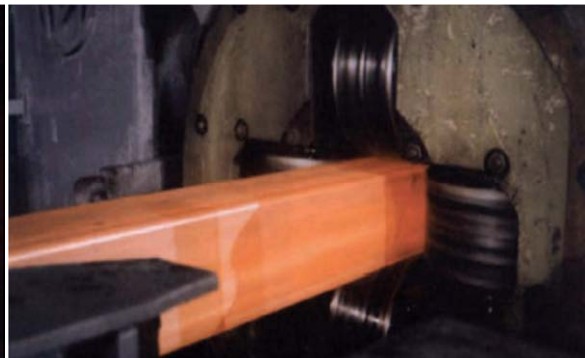


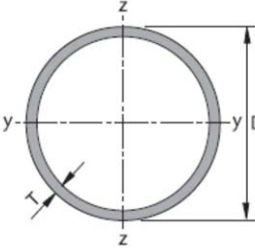
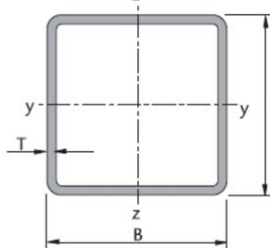
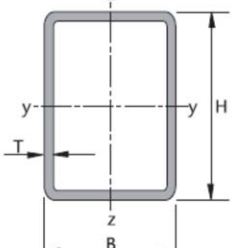
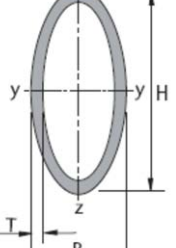
Figura 1.1.10 Perfil tubular conformado en caliente

## 1.1.2 Simbología y normativa

### 1.1.2.1 Simbología

Se utilizan preferentemente las siguientes designaciones mostradas en la tabla 1.1.3 en aplicaciones estructurales (21) (16):

Tabla 1.1.3 Simbología de los perfiles tubulares de acero.

<b>CHS</b> (Circular Hollow Section) Perfil hueco de sección circular.	<b>RHS</b> (Rectangular and square Hollow Section) Perfil hueco de sección cuadrada o rectangular.		<b>EHS</b> (Elliptical Hollow Section) Perfil hueco de sección elíptica
			

### 1.1.2.2 Normativa

Existen en cada país normas nacionales en cada país que definen a los perfiles tubulares de acero acabados en frío o en caliente. En la tabla 1.1.4 se muestran las distintas normativas en el ámbito de los perfiles tubulares de acero. Independientemente de estas normas nacionales, podemos referirnos a las normas de la Organización Internacional para la estandarización (ISO); estas últimas presentan la ventaja de poder utilizarse en un gran número de países.

La mayor parte de los fabricantes de perfiles estructurales no producen todos los tamaños recogidos en estas normas y además pueden producir otros tamaños no incluidos. Las tolerancias en las dimensiones y en las formas para los perfiles tubulares circulares y rectangulares (incluidos los cuadrados) están recogidas en las normas ISO 657-14 (22) e ISO 4019 (23) para perfiles tubulares estructurales conformados en caliente y conformados en frío respectivamente.

**Tabla 1.1.4 Distintas normativas aplicables en el ámbito de los perfiles tubulares de acero.**

<b>• NORMATIVAS APLICABLES</b>	
UNE-EN 10210-1:2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino, Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.</li> </ul>
UNE-EN 10210-2:2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 2: Tolerancias dimensiones y propiedades de sección.</li> </ul>
UNE-EN 10219-1:2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfiles huecos para construcción soldados conformados en frío, de acero no aleado y de grano fino, Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.</li> </ul>
UNE-EN 10219-2:2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío, de acero no aleado y de grano fino, Parte 2: Tolerancias, dimensiones y propiedades de la sección.</li> </ul>
UNE-ENV1993-1-1:1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero.</li> </ul>
CTE-DB-SE-A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Código Técnico de la edificación (2007b) Documento Básico Seguridad Estructural Acero. Ministerio de Fomento.</li> </ul>

Existen varias normas nacionales disponibles que pueden recoger estos y otros tamaños. En Europa, las dos normas aplicables son EN 10210-2 "Perfiles huecos para construcción acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino" (24) y EN 10219-2 "Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino" que están transpuestas a las normas españolas UNE-EN 10210:2007 y UNE-EN 10219-2:2007 (25).

En estas normativas se recogen las tolerancias respectivas a los perfiles tubulares de acero. En la tabla 1.15 se muestran las dimensiones contempladas por la UNE-EN 10219 (26) y por la UNE-EN 10210 (27) de los perfiles tubulares de acero con sección circular, cuadrada rectangular o elíptica y en la tabla 1.1.6 se presentan las dimensiones teniendo en cuenta si son perfiles con soldadura o no, en función de los fabricantes de la Europa comunitaria y el grupo de fabricantes socios del ICT (28).

Tabla 1.1.5 Gama de dimensiones contempladas.

<b>GAMA DE DIMENSIONES CONTEMPLADA EN LAS NORMAS</b>				
Perfil Tubular de sección	UNE-EN 10219		UNE-EN 10210	
	Dimensiones exteriores en mm	Espesor en mm	Dimensiones exteriores en mm	Espesor en mm
Circular (CHS)	hasta 2.500	hasta 40	hasta 2.500	hasta 120
Cuadrada (RHS)	hasta 500 x 500		hasta 800 x 800	
Rectangular (RHS)	hasta 500 x 300		hasta 750 x 500	
Elíptica (EHS)			hasta 500 x 250	

Tabla 1.16 Gama de dimensiones disponibles por fabricantes de perfiles tubulares circulares y rectangulares

<b>GAMA DE DIMENSIONES DISPONIBLE</b> (Dimensiones exteriores en mm)				
		Grupo de Fabricantes de Europa Comunitaria	Grupo de Fabricantes Socios del ICT	
Acabados o Conformados en Caliente UNE-EN 10210 (con o sin soldadura)		CHS	hasta 711 x 100	hasta 406,4 x 16
		RHS cuadrados	hasta 400 x 400 x 20	hasta 400 x 400 x 16
		RHS rectangulares	hasta 500 x 300 x 20	hasta 500 x 300 x 16
Conformados en Frío UNE-EN 10219 (con soldadura longitudinal)	Proceso en continuo	CHS	hasta 609,6 x 20	hasta 406,4 x 16 resto hasta 508 x 10
		RHS cuadrados	hasta 500 x 500 x 20	hasta 400 x 400 x 16
		RHS rectangulares	hasta 500 x 300 x 20	hasta 500 x 300 x 16
	Proceso en discontinuo	CHS	desde 609,6 x 25 hasta 3.175 x T convenido	

En la tabla 1.1.7 y 1.1.8 se observan las tolerancias dimensionales, forma, rectitud y masa contemplada en las normas UNE-EN 10219 para los Perfiles Tubulares conformados en frío y UNE-EN 10210 para los conformados

o acabados en caliente dependiendo de si su sección es circular o cuadrada o rectangular.

**Tabla 1.1.7 Tolerancias de fabricación en perfiles tubulares de acero circular en función de su tipo de conformación frío o caliente**

	PERFIL TUBULAR DE SECCIÓN CIRCULAR (CHS)	
	FRÍO	CALIENTE
Dimensiones Exteriores (D,B,H)	± 1 % con un mínimo de exteriores ± 0,5 mm y un máximo de ± 10 mm	
Espesor (T)	Para D < 406,4 mm T < 5 mm: ± 10 % T > 5 mm: ± 0,5 mm	- 10 %  En perfiles huecos sin soldadura, se puede llegar hasta -12,5 % sin que se supere el 25 % de la circunferencia
	Para D > 406,4 mm ± 10 % con un máximo de ± 2 mm	
Ovalidad (O)	2 % para perfiles con una relación D/T < 100	
Rectitud €	0,20 % de la longitud total y 3 mm sobre cualquier tramo de 1 m de longitud	0,20 % de la longitud total
Masa por unidad de longitud (M)	± 6 % sobre longitudes de suministro individuales	

**Tabla 1.1.8 Tolerancias de fabricación en perfiles tubulares de acero cuadrados o rectangulares en función de su tipo de conformación frío o caliente.**

	PERFIL TUBULAR DE SECCIÓN CUADRADA O RECTANGULAR (RHS)	
	FRÍO	CALIENTE
$H, B < 100$	$\pm 1 \%$ con un mínimo de $\pm 0,5 \text{ mm}$	$\pm 1 \%$ con un mínimo de $\pm 0,5 \text{ mm}$
$100 < H, B < 200$	$\pm 0,8 \%$	
$H, B > 200$	$\pm 0,6 \%$	$- 10 \%$ En perfiles huecos sin soldadura, se puede llegar hasta $-12,5 \%$ sin que se supere el $25 \%$ de la circunferencia
	$T < 5 \text{ mm}$ : $\pm 10 \%$	
	$T > 5 \text{ mm}$ : $\pm 0,5 \text{ mm}$	
	Máximo $0,8 \%$ con un mínimo de $0,5 \text{ mm}$	$1 \%$
	$0,15 \%$ de la longitud total y $3 \text{ mm}$ sobre cualquier tramo de $1 \text{ m}$ de longitud	$0,20 \%$ de la longitud total
	$\pm 6 \%$ sobre longitudes de suministro individuales	

En la tabla 1.1.9 y 1.1.10 se representan las tolerancias de fabricación que marca la normativa y los puntos destacables que se obtienen de cada uno de los procesos de conformación ya sea en frío o en caliente. Cabe destacar que las tolerancias de producción son, en general, inferiores a las correspondientes en las secciones abiertas. (29)

**Tabla 1.1.0.1 Tolerancias de fabricación en perfiles tubulares conformados en frío y caliente**

CALIENTE			FRÍO	
Longitud variable	4 000 < L < 16 000 con un rango de 2000 por cada partida de pedido	El 10 % de los perfiles suministrados pueden estar por debajo del mínimo del rango pedido, pero ninguno debe ser inferior al 75 % de la longitud mínima del rango	4 000 < L < 16 000 con un rango de 2000 por cada partida de pedido	El 10 % de los perfiles suministrados pueden estar por debajo del mínimo del rango pedido, pero ninguno debe ser inferior al 75 % de la longitud mínima del rango
Longitud aproximada	4 000 < L < 16 000	± 500 mm	> 4000	+ 50 mm
Longitud exacta	2000 < L < 60 000	+ 10 mm	< 6 000	+ 5 mm
	> 6 000	+ 15 mm	6 000 < L < 10 000	+ 15 mm
			> 10 000	+ 5 mm + 1 mm/m

**Tabla 1.1.10 Geometría de los perfiles tubulares: Puntos destacables**

CRITERIO 1. GEOMETRÍA: PUNTOS DESTACABLES	
CONFORMADOS EN FRÍO UNE-EN 10219	CONFORMADOS EN CALIENTE UNE-EN 10210
El proceso de fabricación consigue un mejor control de la geometría de la sección transversal del perfil.	Disponibilidad de gama con mayor rango de espesores por referencia.
Tolerancias más estrictas en parámetros geométricos claves de la sección transversal del perfil: Dimensiones exteriores (B, H); Espesor (T) y Radios de encuentro en las esquinas (C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> ó R). También en parámetros geométricos de carácter más secundario, como la Longitud de suministro.	Menores radios de encuentro en las esquinas de los Perfiles Tubulares RHS.

Por último en la tabla 1.1.11 se establece una clasificación con las principales clases de acero utilizados para perfiles tubulares de acero.



Tabla 1.1.11 Clases de acero para perfiles tubulares

	CLASES DE ACERO PARA PERFILES TUBULARES			
	Conformados en Frío UNE-EN 10219		Conformados en Caliente UNE-EN 10210	
Calidad de ACERO	Designación simbólica	Designación numérica	Designación simbólica	Designación numérica
No aleado	S235JRH	1.0039	S235JRH	1.0039
	S275J0H	1.0149	S275J0H	1.0149
	S275J2H	1.0138	S275J2H	1.0138
	S355J0H	1.0547	S355J0H	1.0547
	S355J2H	1.0576	S355J2H	1.0576
	S355K2H	1.0512	S355K2H	1.0512
No aleado de grano fino	S275NH	1.0493	S275NH	1.0493
	S275NLH	1.0497	S275NLH	1.0497
	S355NH	1.0539	S355NH	1.0539
	S355NLH	1.0549	S355NLH	1.0549
Especial aleado de grano fino			S420NH	1.8750
			S420NLH	1.8751
	S460NH	1.8953	S460NH	1.8953
	S460NLH	1.8956	S460NLH	1.8956
	S275MH	1.8843		
	S275MLH	1.8844		
	S355MH	1.8845		
	S355MLH	1.8846		
	S420MH	1.8847		
	S420MLH	1.8848		
	S460MH	1.8849		
	S460MLH	1.8850		

### 1.1.3 Propiedades mecánicas de perfiles tubulares de acero

Los perfiles tubulares de acero pueden ser utilizados como sustitución no solo del hormigón, sino que además los perfiles tubulares de acero pueden sustituir a otros tipos de perfiles debido a su resistencia y a su estabilidad (29).

Los perfiles tubulares se fabrican con aceros similares a los utilizados para otros tipos de perfiles de acero, por lo que en principio no existe entre éstos diferencia alguna, y las propiedades mecánicas se dan según parámetros estandarizados. Se utiliza la norma europea EN10210-1 para perfiles tubulares estructurales acabados en caliente de aceros estructurales no aleados y de

grano fino. Los requisitos para los perfiles tubulares conformados en frío están recogidos en la norma EN10219-1: "Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino", pero los requisitos en ambas normas son prácticamente idénticos.

En la tabla 1.1.12 se recoge el contenido correspondiente a las características mecánicas de los aceros más empleados (de calidad no aleados), para los Perfiles tubulares según norma UNE-EN 10219 y espesor de pared  $\leq 40$  mm, como para los Perfiles Tubulares según norma UNE-EN 10210 y espesor de pared  $\leq 120$  mm. (16)

**Tabla 1.1.12 Características mecánicas de los perfiles tubulares de acero para la construcción (de acero no aleado) UNE-EN 10219 y UNE-EN 10210.**

Clase de acero	Límite elástico mínimo Re (MPa)								Resistencia a la tracción Rm (MPa)					Alargamiento mínimo A (%)					Energía mín. de rotura en flexión por choque (J)			
Desig. simbólica	Espesor nominal (mm)								Espesor nominal (mm)					Espesor nominal (mm)					Temperatura de ensayo			
	< 16		>16 <40		>40 <63		>63 <80		>80 <100	>100 <120	<3	<3	>3 <40	>3< 100	>100 <120	<40	<40	>40 <63	>63 <100	>100 <120	- 20 °C	0 °C
S235JRH	235	235	225	225	215	215	215	195	360-510	360-10	360-510	360-510	350-500	24	26	25	24	22	-	-	27	
S275J0H	275	275	265	265	255	245	235	225	430-580	430-580	410-560	410-560	400-540	20	23	22	21	19	-	27	-	
S275J2H																			27	-	-	
S355J0H	355	355	345	345	335	325	315	295	510-680	510-680	470-630	470-630	450-600	20	22	21	20	18	-	27	-	
S355J2H																			27	-	-	
S355K2H																			40 (a)	-	-	
(a) Este valor corresponde a 27 J a una temperatura de ensayo de - 30 °C (véase la Norma Europea EN 1993-1-1).																						

(a) Este valor corresponde a 27 J a una temperatura de ensayo de - 30 °C (véase la Norma Europea EN 1993- 1-1).

El conformado en frío de los Perfiles Tubulares proporciona (30) un incremento del límite elástico del acero base debido al endurecimiento por deformación. En los perfiles conformados en frío, el incremento en el límite de fluencia se podrá tener en cuenta. Las recomendaciones y fórmulas para la aplicación de estas reglas únicamente podrán utilizarse en perfiles tubulares RHS (cuadrados o rectangulares) y en elementos estructurales sometidos a esfuerzos de tracción o de compresión.

Límite elástico medio: El límite elástico medio del acero después de la conformación en frío  $f_{ya}$  puede determinarse mediante (ecuación 1.1.1):

**Ecuación 1.1.1 Límite elástico medio del acero después de la conformación en frío**

$$f_{ya} = f_{yb} + \left( \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A} \right) \cdot (f_u - f_{yb})$$

$f_{yb}$ ,  $f_u$  = Límite elástico especificado y Resistencia última a la tracción del material de base (N/mm<sup>2</sup>).

$t$  = Espesor del material (mm).

$A$  = Área bruta del perfil (mm<sup>2</sup>).

$K$  = Coeficiente que depende del tipo de conformado ( $k = 7$  para laminado en frío).

$n$  = Número de doblados de 90° en la sección con un radio interno  $< 5t$ .

$f_{ya}$  = No debe superar  $f_u$  ó  $1,2 f_{yb}$ .

#### **1.1.4 Dimensionamiento a flexión**

En general, las secciones IPE y IPN son más económicas bajo flexión (la inercia máxima es mayor que la de perfiles tubulares). Los perfiles tubulares de acero podrán ofrecer ventajas en el caso de que la tensión de cálculo en los perfiles abiertos sea directamente causada por el pandeo lateral. (30)

Se puede demostrar mediante cálculos que para los perfiles tubulares circulares y para los rectangulares con  $b/h > 0,25$ , (los normalmente utilizados), la inestabilidad lateral no es crítica. Resulta evidente que los perfiles tubulares son especialmente favorables, comparados con otros perfiles, si la flexión actúa en ambos ejes.

Se puede conseguir una gran economía en el cálculo de los perfiles tubulares en elementos sometidos a flexión utilizando el cálculo plástico (31). Al igual que en otros perfiles de acero sometidos a flexión, pueden observarse diferentes comportamientos en cuanto a momentos-curvaturas. En la figura 1.1.11 se observa que la curva de momentos-curvatura muestra una considerable capacidad de rotación, con lo que puede utilizarse para su cálculo el método plástico.

### 1.1.4.1 Clasificación de las secciones

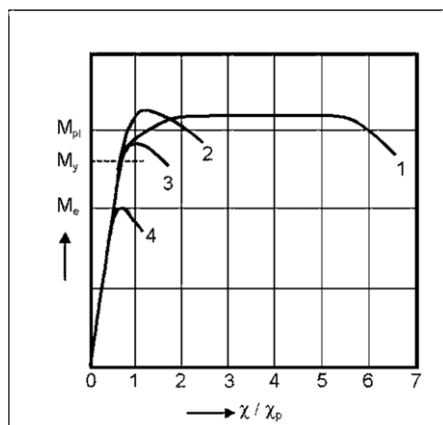


Figura 1.1.11 Diagramas momentos-curvaturas

El objetivo fundamental que busca esta clasificación (32) (33) es el aprovechamiento plástico de las secciones, para poder así reducir el consumo de acero. Para ello se estudia la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección solicitada por un momento flector. En la tabla 1.1.13 y 1.1.14 se muestran las clasificaciones de las

secciones establecidas por el CTE DB-SE-A y el método de cálculo a emplear.

Tabla 1.1.13 Clasificación de secciones transversales solicitadas por momentos flectores (Tabla 5.1 CTE DB-SE-A)


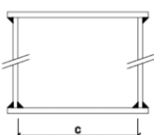
CLASE 1: PLÁSTICA	Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos.
CLASE 2: COMPACTA	Permiten el desarrollo del momento plástico con una capacidad de rotación limitada.
CLASE 3: SEMICOMPACTA	En la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico
CLASE 4: ESBELTA	Los elementos total o parcialmente comprimidos de las secciones esbeltas se abollan antes de alcanzar el límite elástico en la fibra más comprimida.

Tabla 1.1.14 Métodos de cálculo (tabla 5.2 CTE DB-SE-A)

Clase de sección	Método para la determinación de las solicitaciones	Método para determinación de la resistencia de las secciones
Plástica	Plástica o Elástica	Plástica o Elástica
Compacta	Elástico	Plástica o Elástica
Semicompacta	Elástico	Elástico
Esbelta	Elástico con posible reducción de rigidez	Elástico con resistencia reducida

La clasificación de una sección u otra depende de la capacidad de aprovechamiento de la sección antes de que se produzcan los fenómenos localizados de abolladura. Por lo que esta clasificación depende directamente de las dimensiones de los elementos. Como regla general los perfiles tubulares de acero suelen ser de clase 1 (las clases 2 y 3 serán los que tengan un menor espesor). En la tabla 1.1.15 se muestra las especificaciones para la clasificación de secciones para perfiles tubulares circulares y de sección cuadrada.

**Tabla 1.1.15 Cálculo analítico para la clasificación de secciones (Resumen tabla 5.3 CTE DB-SE-A)**

TIPOS DE PERFILES TUBULARES		ESBELTEZ MÁXIMA	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
Perfiles Circulares		$c/t \leq$	$50 \epsilon^2$	$70 \epsilon^2$	$90 \epsilon^2$
Perfiles rectangulares		$d/t \leq$	$72 \epsilon^2$	$83 \epsilon^2$	$124 \epsilon^2$

Donde épsilon ( $\epsilon$ ) es el factor de reducción que se obtiene de la ecuación 1.1.2:

**Ecuación 1.1.2 Factor de corrección**

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Siendo,  $f_y$  el límite elástico del acero empleado, en N/mm<sup>2</sup>.

Otra de las especificaciones que el Eurocódigo 3 (31) exige que se cumpla es comprobar la fluencia de los elementos (para garantizar la suficiente capacidad de deformación o rotación). La ecuación 1.1.3 muestra la relación entre la tensión en el límite elástico y la tensión de rotura, especialmente importante en perfiles tubulares de acero. Este es solamente un aspecto referente a la ductilidad. En la tabla 1.1.16 se muestra la resistencia a flexión de las secciones en función de las diferentes clasificaciones de las secciones que se establece en el CTE DB-A (33). En función de cada una de las clases

se calculará de una manera u otra el módulo resistente a utilizar (plástico, elástico, o de la sección eficaz).

#### Ecuación 1.1.3 Condición de ductilidad

$$\frac{f_u}{f_y} \geq 1.2$$

Tabla 1.1.16 Resistencia a flexión de secciones en función de su clase (Artículo 6.2.6 CTE DB-A)

RESISTENCIA DE LAS SECCIONES A FLEXIÓN $M_{c,Rd}$		
Resistencia plástica de la sección bruta para las secciones de clase 1 y 2	$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd}$	$W_{pl}$ módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión
Resistencia elástica de la sección bruta para las secciones de clase 3	$M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yd}$	$W_{el}$ módulo resistente elástico correspondiente a la fibra con mayor tensión
Resistencia a abolladura para las secciones de clase 4	$M_{0,Rd} = W_{eff} \cdot f_{yd}$	$W_{ef}$ módulo elástico de la sección eficaz (correspondiente a la fibra con mayor tensión)

#### 1.1.4.2 Cálculo en elasticidad

Las tensiones normales y tangenciales deben verificar las relaciones siguientes (7):

Flexión mono axial: Flexión en un solo eje, su fundamento viene indicado en la ecuación 1.1.4:

#### Ecuación 1.1.4 Flexión Simple

$$M \leq M_{el} \quad \text{ó} \quad \frac{M}{W} \leq f_y$$

En la cual  $M$  es el momento de flexión bajo las cargas ponderadas y  $M_{el}$  es el momento elástico de cálculo.

Flexión biaxial: es necesario combinar las tensiones bajo los dos momentos de flexión (ecuación 1.1.5).

Ecuación 1.1.5 Flexión biaxial

$$\frac{M_z}{W_{xx}} + \frac{M_y}{W_{yy}} \leq f_y$$

### 1.1.4.3 Cálculo en plasticidad

El cálculo plástico sólo puede ser utilizado si la construcción presenta ciertas condiciones que garanticen el desarrollo de la plasticidad en el corazón de la sección y la redistribución de las tensiones entre las secciones. Las condiciones a cumplir son las siguientes:

1. El acero presente una ductilidad suficiente; esta ductilidad se cumple si, en el curso de un ensayo de tracción, la longitud de la meseta de estirado es por lo menos seis veces la dilatación máxima elástica.
2. El acero no haya sufrido una deformación en frío demasiado grande; esta condición se cumple si la relación de la tensión de rotura al límite elástico es superior a 1,2.
3. Las uniones entre elementos permitan una rotación plástica suficiente.
4. La estructura no manifieste ningún fenómeno de inestabilidad antes de la rotura plástica.

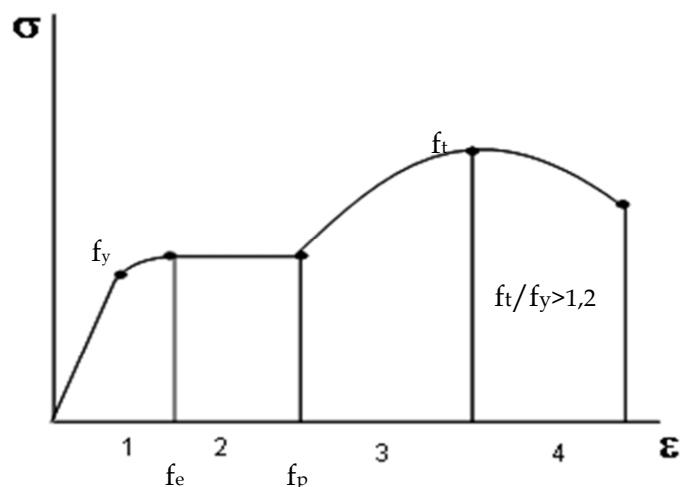


Figura 1.1.12 Diagramas tensión-deformación de un acero

En la figura 1.1.12 se representa el diagrama de tensión deformación de un acero genérico, señalando los puntos más importantes del mismo, como la tensión de rotura y la tensión en el límite elástico.

#### 1.1.4.3.1 Cargas de plastificación

El cálculo plástico extrae el máximo provecho de la ductilidad del material y se basa en el cálculo de la capacidad de soporte real de la estructura. En caso específico de la flexión si puede usarse el cálculo plástico es más económico que el cálculo elástico. La figura 1.1.13 muestra la distribución de las tensiones cuando tiene lugar la plastificación total de la sección cuando el momento de flexión y el esfuerzo cortante actúan por separado.

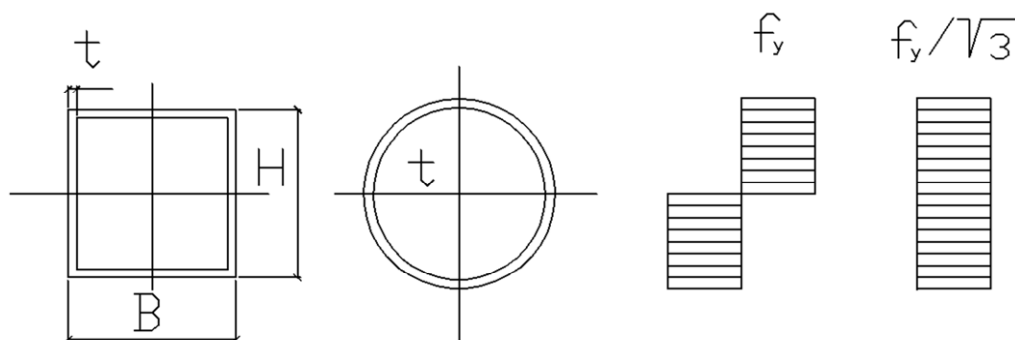
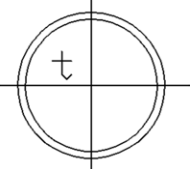
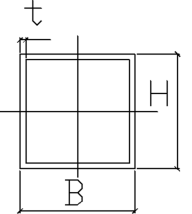


Figura 1.1.13 Reparto de las tensiones cuando la sección esta completamente plastificada

El cuadro adjunto (tabla 1.1.17) permite calcular fácilmente y con una buena aproximación las cargas de plastificación total para el caso de perfiles tubulares de sección circular o rectangular.



Tabla 1.1.17 Cargas de plastificación total

CARGAS DE PLASTIFICACIÓN TOTAL	
Perfil	Flexión
	$M_{pl} = t d_m^2 f_y$
	$M_{pl} = \frac{3}{2} t b_m^2 f_y$

El momento  $M_{pl}$  puede calcularse de modo más preciso con ayuda de las características geométricas por medio de la siguiente relación: (ecuación 1.1.6):

Ecuación 1.1.6 Cálculo de momento plástico

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$$

La relación entre el momento de plastificación completa y el momento elástico de un determinado perfil se denomina factor de forma. El factor de forma proporciona una indicación acerca de la posible reserva plástica de una sección transversal. Como aproximación se pueden considerar los valores que se muestran en el cuadro inferior en función del tipo de sección cuadrada o rectangular (tabla 1.1.18):

Tabla 1.1.18 Factor de forma de los perfiles tubulares de acero

PERFIL	FACTOR DE FORMA
Circular	1,27
Cuadrado	1,13

## **1.2 Aplicaciones en protecciones colectivas de los perfiles tubulares**

### **1.2.1 Introducción**

Se podría definir la protección colectiva como un elemento de seguridad que protege a uno o varios trabajadores. También se puede definir como un elemento de protección que sirve para proteger cualquier trabajador sin necesidad de realizar éste ningún tipo de operación.

La protección colectiva es la primera que se debe adoptar frente a un riesgo. La mayoría de las protecciones colectivas evitan el riesgo, otras solo lo controlan, evitando la lesión después de materializarse el riesgo. Son barreras artificiales provisionales, intercaladas entre la superficie de trabajo y el suelo, con el fin de evitar la caída de trabajadores y materiales.

Debido a la gran importancia que adquieren las protecciones colectivas, es necesario fabricarlas con materiales fiables que sean capaces de cumplir con los mínimos requeridos en cada caso. Por este motivo, el material más empleado para estos cometidos es el acero, y por ende los perfiles tubulares de acero.

En este apartado se va a realizar un estudio pormenorizado de los más representativos sistemas utilizados como protecciones colectivas en edificación que incorporen entre sus elementos a los perfiles tubulares de acero.

### **1.2.2 Sistemas de protección de borde**

Los sistemas provisionales de protección de borde se analizan de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE-EN 13374. (34) La norma citada se aplica a los sistemas de protección de borde para superficies horizontales o inclinadas. Son sistemas que evitan la caída desde forjados y huecos durante la construcción del edificio. La mayoría de los elementos empleados en los sistemas de protección de borde están realizados con

perfiles tubulares de acero, por ello como se verá a continuación se procederá al estudio de los diferentes sistemas de protección de borde para analizar estos elementos.

Las partes fundamentales que constituyen los sistemas de protección son las siguientes:

**Poste:** Elemento vertical rígido normalmente a base de perfiles tubulares de acero que permite el anclaje del sistema al borde de la zona a proteger. En el poste se fijan los restantes elementos que constituyen el sistema de protección (barandilla principal, barandilla intermedia y plinto o rodapié).

**Sistema de protección de borde instalado:** Se suelen realizar con perfiles tubulares de acero de  $\varnothing$  40mm,  $e=1,5$  mm, y 1,50 m de altura, con escuadras soldadas ( $\varnothing$ 10 mm) para soportar las barandillas.

**Barandilla principal:** Está destinada a proporcionar sujeción utilizando la mano y a cortar la trayectoria de movimiento de un trabajador que se dirigiera hacia el borde a proteger, impidiendo la caída de altura, también para este uso se utilizan perfiles tubulares de acero.

**Barandilla intermedia:** Elemento rígido colocado en el hueco existente entre la barandilla principal y el rodapié, que impide el deslizamiento de un trabajador por dicho hueco. La barandilla intermedia, también a su vez suelen ser a base de perfiles tubulares de acero de aproximadamente  $\varnothing$  30 mm,  $t=1,5$  mm, y una longitud de 2,50 m, con anillas extremas ("orejas", "asas", etc.) para su fijación en las escuadras soldadas del poste.

**Rodapié:** elemento rígido colocado a nivel de suelo.

### 1.2.2.1 Barandillas como sistema de protección de borde

Una barandilla es un elemento que tiene por objeto proteger contra los riesgos de caída fortuita al vacío de personas trabajando o circulando junto al mismo. Las barandillas serán resistentes, tendrán una altura mínima de 90 centímetros y dispondrán de un reborde de protección, un pasamanos y una protección intermedia que impidan el paso o deslizamiento de los trabajadores (35) (36).

Son los sistemas de protecciones de borde más utilizados en las obras de construcción. Deben instalarse siempre que exista riesgo de caída de altura superior a 2 m. En la tabla 1.2.1 se ha realizado una relación de elementos que están realizados normalmente a base de perfiles tubulares circulares de acero. En la tabla 1.2.2 se representan las normativas más relevantes en el ámbito de las barandillas.

Las principales secciones utilizadas para barandillas que se pueden encontrar en el mercado en barandillas superior e intermedia suelen ser secciones circulares de 35-40 mm de diámetro y 1,5-2,5 mm de espesor (37), estas dimensiones pueden variar en función de las necesidades de cada obra.

Tabla 1.2.1 componentes de las barandillas que están hechos a base de perfiles tubulares de acero


PRINCIPALES COMPONENTES DE LAS BARANDILLAS		
Normalmente ejecutada con perfiles tubulares de acero (circulares o rectangulares)	Poste	
	Barandilla principal	
	Barandilla intermedia	
Realizados con otros materiales distintos	Rodapié	<p>Figura 1.2.1 Barandillas utilizadas como sistema de protección de borde</p>

Tabla 1.2.2 Relación de normativa para barandillas de seguridad

<b>NORMATIVA APLICABLE A BARANDILLAS</b>	
UNE 85239:1991 IN	Cálculo de secciones de los elementos. Características de los anclajes, condiciones de suministro y de instalación en obra. (38)
UNE 85240:1990	Barandillas clasificación. (39)
UNE 85237:1991	Barandillas. Definiciones, Terminología, condiciones generales de seguridad. (40)
UNE 85238:1991	Barandillas. Métodos de ensayos (41)

### 1.2.2.2 Sistema tipo horca

Este sistema de protección colectiva está constituido por la red clasificada como tipo "V" y el soporte tipo horca (pescante) anclado o embutido en el forjado. Han de cumplir con la norma UNE-EN 13374:2004.

Pensado fundamentalmente para ser utilizado en la fase de estructura el sistema tipo horca no evita la caída pero atenúa claramente los efectos y es hoy por hoy pieza imprescindible en la implantación de protecciones colectivas en obras de edificación.

Este sistema al no impedir la caída siempre debe ir acompañado de sistemas de protección colectiva que eviten la misma; sistemas de protección de borde o líneas de vida. Así mismo el sistema está estudiado para absorber caídas de 6 m de altura como máximo. En la figura 1.2.2 se muestra el sistema tipo horca colocado en obra, y en la figura 1.2.3 se muestra un esquema más visual de la implantación del sistema tipo horca. En la tabla 1.2.3 se enumeran los elementos que componen el sistema y los que se desarrollan con perfiles tubulares de acero.



Figura 1.2.2 Sistema tipo horca colocado en obra

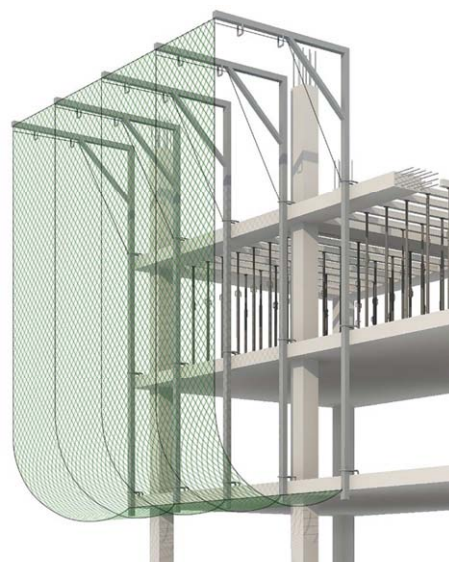


Figura 1.2.3 Esquema del sistema tipo horca

Tabla 1.2.3 Elementos principales del sistema tipo horca que utilizan perfiles tubulares de acero

ELEMENTOS PRINCIPALES DEL SISTEMA TIPO HORCA (deben cumplir con la normativa UNE-EN 13374:2004)			
<b>UTILIZAN PERFILES TUBULARES PARA SU FORMACIÓN</b>	Soporte metálico	Es del tipo horca a base de perfiles tubulares de acero con medidas estándar de 60x60x3 mm de sección, de 8 m (peso 63 kg, montados en 2 tramos) o 9 m (64 kg, montados en 3 tramos) de brazo vertical y 2 m de brazo horizontal con acabado pintado o galvanizado. Las dimensiones pueden variar en función de las necesidades de cada obra	
	Anclaje forjado para soporte horca	Normalmente se utiliza ferralla con diámetro mínimo de 12mm. También se pueden utilizar perfilerías tubulares metálicas fijados mecánicamente	
<b>UTILIZAN OTRO TIPO DE MATERIALES PARA SU FORMACIÓN</b>		Red de seguridad	
		Cordelería, atado y cosido	

### 1.2.2.3 Sistema de bandejas

Se trata de un sistema compuesto por un conjunto de redes horizontales solapadas entre si y apoyadas sobre unos largueros a modo de bandeja (también llamado sistema T). Estos se acoplan a unos soportes metálicos tipo mordaza y se anclan a la estructura del edificio. Debido a la flexibilidad y

elasticidad del sistema, la red cuando recibe un impacto, forma una bolsa de recogida para la masa que ha impactado, amortiguando su caída y reteniéndola en el interior de la bolsa evitando que salga despedida.

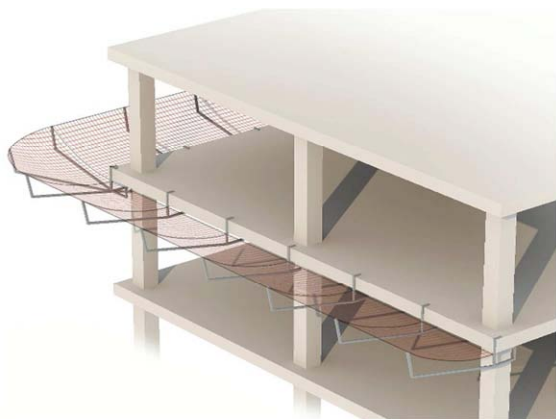


Figura 1.2.4 Esquema del sistema de bandeja

La mordaza con la que cuenta el sistema permite crear un voladizo de aproximadamente 3 m con los que se puede estimar que la red es capaz de absorber 6 m de altura de caída desde el plano de trabajo. Estas redes no son de aplicación para proteger el primer forjado debido a que para la fijación del soporte a dicho forjado es

necesario que el mismo haya fraguado. (42)

En la figura 1.2.4 se muestra un esquema del sistema de bandeja mientras que en las figuras 1.2.5 y 1.2.6 se presenta el sistema colocado en obra.



Figura 1.2.5 Sistema de bandeja en obra



Figura 1.2.6 Sistema de bandeja en obra

Como estudio de los elementos que presenta este sistema a base de perfiles tubulares de acero se muestra la tabla 1.2.4 en la que se enumeran todos los componentes clasificados en función de si están realizados a base de perfiles tubulares de acero o de otros materiales.

Tabla 1.2.4 Componentes del sistema de bandejas

<b>COMPONENTES DEL SISTEMA DE BANDEJAS</b> (deben cumplir con la normativa UNE-EN 13374:2004)			
UTILIZAN PERFILES TUBULARES DE ACERO	LARGUEROS	Están compuestos por perfiles tubulares de acero en los que en su interior se introduce una red. Están constituidos por material flexible apropiado para obtener una deformación plástica óptima, formando, junto a la red, una bolsa de recogida. Suelen tener dimensiones de sección 50 Ø x 4 mm.	
	SOPORTE	Constan de dos partes: Base: es la que ejerce la fuerza sobre el forjado en el caso de recibir un impacto. Según el tipo de soporte puede ser de varias clases.  Mordaza: conjunto de elementos metálicos (pudiendo ser a base de perfiles tubulares de acero) que se fijan al suelo mediante tacos metálicos y un husillo que se ajusta al borde del forjado.	
	BRAZO	Elemento tubular metálico con una longitud aproximada de 5 m constituido por un tubo de 50 mm de diámetro. Se ancla al forjado unido a la base del soporte que, según el tipo de base, irá fijado por pasadores o presionado con puntales.	
FORMADOS POR OTROS MATERIALES		Paño de red	
		Cuerda de atado	
		Cuerda de unión o solapado	

Posteriormente en las siguientes fotografías (figura 1.2.7, 1.2.8 y 1.2.9) se pueden apreciar los perfiles tubulares que conforman cada elemento del sistema de bandejas, como la mordaza y el soporte que están formados por perfiles rectangulares y el larguero que se observa que es un perfil circular de acero.





Figura 1.2.7 Mordaza



Figura 1.2.8 Soporte



Figura 1.2.9 Larguero

En la figura 1.2.10 se muestra un despiece pormenorizado del sistema de bandejas, en el que salvo la red, tuercas, arandelas, pernos, gancho para grúas y fijadores todos los elementos se realizan con perfiles tubulares de acero.

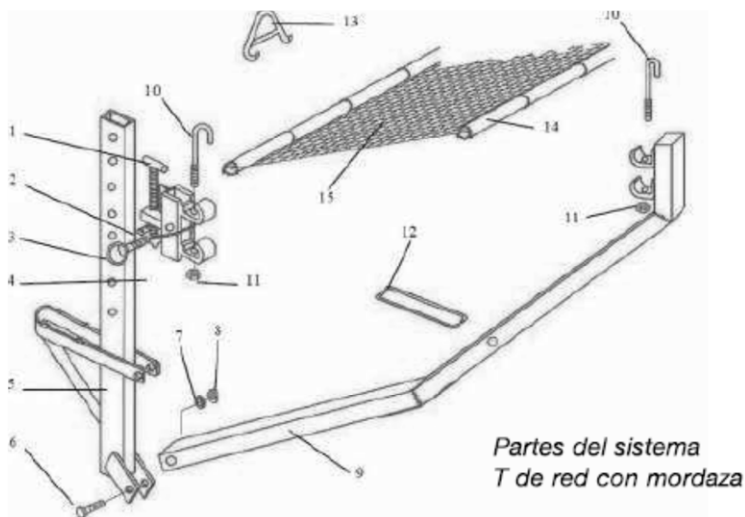


Figura 1.2.10 sistema de bandeja (con red y mordaza)

1. Husillo
2. Garra de anclaje
3. Perno
4. Mordaza Superior
5. Mordaza inferior
6. Tornillo
7. Arandela
8. Tuerca de Apriete
9. Brazo
10. Seguro
11. Tuerca del seguro
12. Fijador
13. Gancho para grúa (opcional)
14. Larguero
15. Red

#### 1.2.2.4 Plataformas de descarga de materiales

Una plataforma de descarga de materiales está concebida para acopiar y recoger materiales de construcción en distintos niveles de la obra. Está constituido por una estructura auxiliar temporal que se coloca en voladizo. Se accede a la plataforma mediante grúas u otros equipos de elevación para el acopio de los materiales. En la figura 1.2.11 y 1.2.12 se aprecian distintos

ángulos de una plataforma de descarga colocada en obra. La normativa que rige a las plataformas de descarga es la UNE 180401:2010. (43)

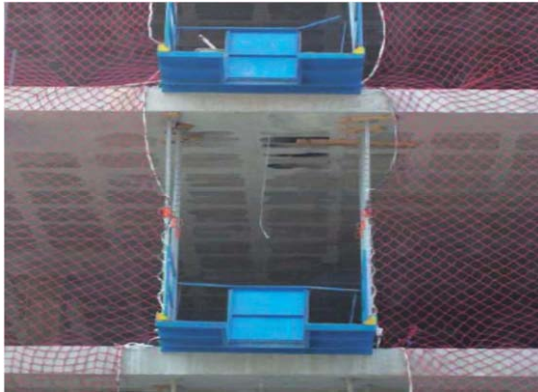


Figura 1.2.11 Plataforma de carga y descarga ubicada en obra



Figura 1.2.12 Plataforma de carga y descarga ubicada en obra

Los materiales que componen el sistema deben ser suficientemente robustos y duraderos para cumplir las condiciones de trabajo necesarias y por ello en la actualidad es el acero el material mas empleado en la fabricación de este tipo de plataformas. La configuración del sistema debe tener:

- Altura de barandillas y sus componentes de acuerdo con la norma UNE-EN 13374
- Plataforma de trampilla abatible en su posición cerrada totalmente horizontal, cuando proceda.
- Nivelación perfecta del sistema con la estructura principal.

En la figura 1.2.13 y 1.2.14 se presenta un esquema de la configuración de los elementos que presenta una plataforma de descarga.

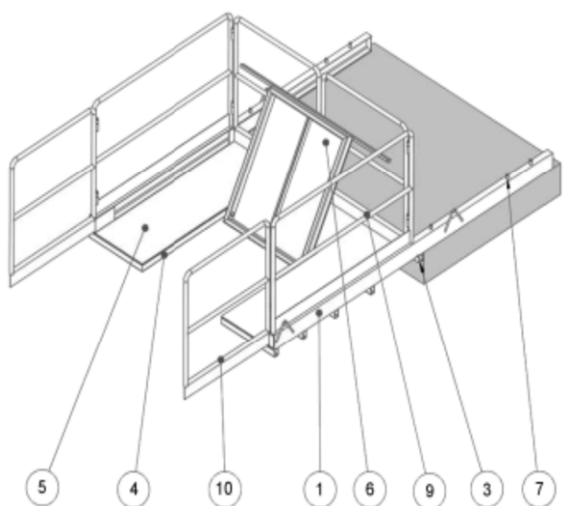


Figura 1.2.13 Ejemplos típicos en una plataforma de carga y descarga

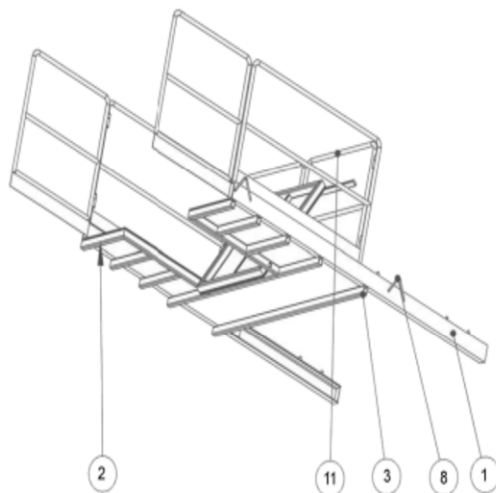


Figura 1.2.14 Ejemplos típicos en una plataforma de carga y descarga

### Leyenda

- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Larguero superior              | 6. Trampilla                        |
| 2. Travesaños inferiores          | 7. Sistema de fijación              |
| 3. Dispositivo de posicionamiento | 8. Dispositivo de elevación         |
| 4. Larguero inferior              | 9. Protección perimetral intermedia |
| 5. Superficie de carga y descarga | 10. Protección perimetral exterior  |
|                                   | 11. Protección perimetral interior  |

En la tabla 1.2.5 se hace un estudio de todos los posibles elementos de los que consta una plataforma de descarga y cuales de éstos elementos esta constituido a base de perfiles tubulares de acero.

Tabla 1.2.5 Elementos a base de perfiles tubulares de acero de plataformas de descarga

ELEMENTOS A BASE DE PERFILES TUBULARES DE ACERO DE PLATAFORMAS DE DESCARGA	
Elementos normalmente realizados con perfiles tubulares de acero	• Larguero superior
	• Travesaños inferiores
	• Dispositivo de posicionamiento
	• Protección perimetral intermedia
	• Protección perimetral exterior
	• Protección perimetral interior
Elementos hechos a base de otros materiales	• Larguero inferior
	• Superficie de carga y descarga
	• Trampilla
	• Sistema de fijación
	• Dispositivo de elevación

## **1.3 Medios auxiliares en edificación**

### **1.3.1 Introducción: Andamios**

Los medios auxiliares de fabricación pertenecen al grupo de recursos empleados en una obra. No intervienen directamente en el proceso productivo, pero sin ellos el proceso no se puede llevar a cabo.

Medios auxiliares de fabricación son, por ejemplo, herramientas, equipo de medición, grúas, andamios. En el ámbito de este trabajo nos centraremos en el estudio de los andamios metálicos a que incorporen en su sistema perfiles tubulares de acero como medio auxiliar de construcción.

Los andamios son construcciones provisionales destinadas a establecer un plano de trabajo a una altura adecuada para que este pueda realizarse cómodamente ocasionalmente también se pueden utilizar para acopiar materiales precisos para la ejecución de éstos. Por tanto habrán que soportar de un modo seguro y estable al personal, a los materiales y a los útiles de trabajo, ocasionalmente también soportarán los acopios.

Los materiales con los que suelen estar contruidos suelen ser perfiles tubulares de acero, por su resistencia y durabilidad; en cualquier caso habrán de garantizar unos valores de resistencia y deformación adecuados y disponer de una protección mínima por galvanización o por revestimiento de pintura así como cumplir las condiciones de incombustibilidad, de resistencia a agentes agresivos o de conductividad que determinados usos puedan requerir. Las condiciones básicas que cumplirán los andamios serán las siguientes:

- Resistencia suficiente ante las cargas, permitiendo solo pequeñas deformaciones.
- Estabilidad ante las cargas.
- Facilidad y seguridad en el montaje y desmontaje.
- Plataformas de trabajo seguras.
- Acceso a las plataformas de trabajo fácil y seguro.

- Adaptabilidad a distintas geometrías y exigencias de diseño.
- Facilidad de transporte, por su poco peso y volumen.
- Protecciones colectivas suficientes para la seguridad en el andamio y bajo él.
- Operarios dotados de las protecciones individuales adecuadas.

La normativa aplicable en andamios es la que se presenta a continuación:

- UNE-EN 74-1:2008 Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 1: Acoplamientos para tubos. Requisitos y procedimientos de ensayo. (44)
- UNE-EN 74-2:2008 Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 2: Acoplamientos especiales. Requisitos y procedimientos de ensayo. (45)
- UNE-EN 74-3:2008 Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 3: Placa base ordinarias y espigas ajustables. Requisitos y procedimientos de ensayo. (46)
- UNE EN 12810-1:2005. Andamios de fachada de componentes prefabricados. Parte 1: Especificaciones de los productos. (47)
- UNE-EN 12810-2:2005. Andamios de fachada de componentes prefabricados. Parte 2: Métodos particulares de diseño estructural. (48)
- UNE-EN 12811-1:2005. Equipamiento para trabajos temporales en obra. Parte 1: Andamios. Requisitos de comportamiento y diseño general. (49)
- UNE-EN 12811-2:2005. Equipamiento para trabajos temporales de obra. Parte 2: Información sobre los materiales. (50)
- UNE-EN 12811-3:2005. Equipamiento para trabajos temporales de obra. Parte 3: Ensayos de carga. (51)
- UNE-76501:1987 Estructuras auxiliares y desmontables. Clasificación y definición. (52)
- UNE-EN 39:2001 Tubos de Acero libres para andamiajes y acoplamientos. Condiciones técnicas de suministro. (53)

### 1.3.2 Andamios metálicos tubulares

Los andamios metálicos tubulares son aquellos que están formados por tubos metálicos, provistos de sistemas de fijación y ocasionalmente agrupados en bastidores o módulos, que requieren normalmente la prefabricación de sus componentes por lo que son también andamios prefabricados. Actualmente son, probablemente, el tipo de andamios más empleados.

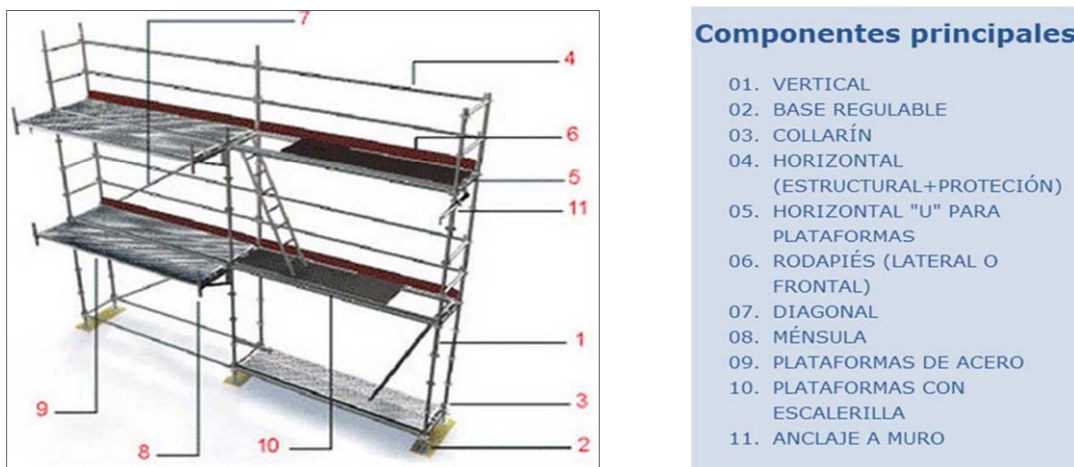


Figura 1.3.1 Componentes principales de un andamio tubular

La gran mayoría de los elementos que compone los andamios metálicos modulares, están realizados a base de perfiles tubulares circulares de acero. Para proceder a su estudio en la figura 1.3.1 se enumeran los componentes principales de este tipo de andamios. En la figura 1.3.2 aparece un croquis del montaje de un andamio metálico modular y en la figura 1.3.3 su implantación en obra.

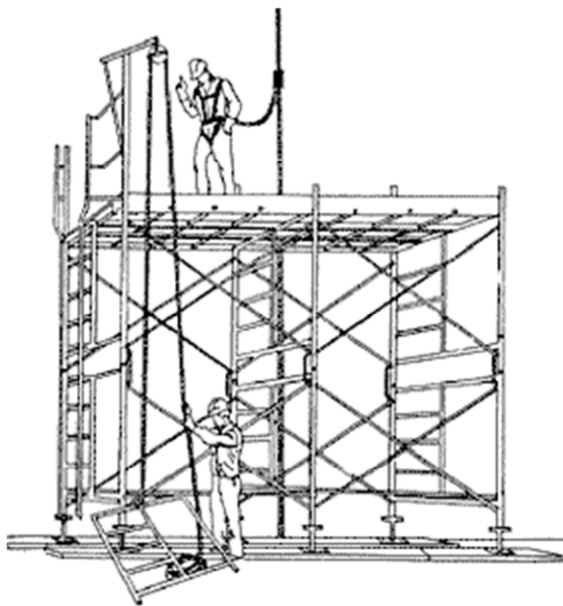


Figura 1.3.2 Croquis de montaje



Figura 1.3.3 Vista de un andamio modular

En la tabla 1.3.1 se muestra la relación de los elementos de andamios metálicos tubulares fabricados a base de perfiles tubulares de acero.

Tabla 1.3.1 Elementos a base de perfiles tubulares de acero de los andamios metálicos modulares

ELEMENTOS A BASE DE PERFILES TUBULARES DE ACERO DE LOS ANDAMIOS METÁLICOS MODULARES	
Elementos normalmente realizados con perfiles tubulares de acero	• Vertical (Postes)
	• Base regulable (contiene elementos)
	• Horizontal (barandillas y función estructural)
	• Diagonal o Cruz de Andrés
	• Ménsula
	• Anclaje a muro (contiene elementos)
Elementos hechos a base de otros materiales	• Collarín
	• Rodapiés (lateral o frontal)
	• Plataformas de acero
	• Plataformas con escalerilla
	• Horizontal U para apoyo de plataformas



### 1.3.2.1 Comprobación de estabilidad de los andamios fijos y móviles tubulares

La estabilidad de los andamios tubulares, es la relación entre la altura total del mismo incluidas las barandillas, y el lado menor de la base. Cuando se trata de andamios fijos, la estabilidad, no podrá exceder de 5 y cuando se refiere a andamios móviles, no excederá de 4. (Ecuación 1.3.1) (54)

#### Ecuación 1.3.1 Criterios de estabilidad

- Andamios fijos:  $Estabilidad = \frac{H}{L} \leq 5$
- Andamios móviles:  $Estabilidad = \frac{H}{L} \leq 4$

Siendo H, la altura total del andamio y L, la anchura del lado menor de la base.

Cuando el andamio que se disponga a implantar en obra, supere estos valores de estabilidad, se trata entonces de andamios no autoestables, por lo que deberán arriostrarse. Este criterio es de útil aplicación a la hora del diseño del andamio, con lo que influirá significativamente en las dimensiones de los perfiles tubulares que compongan el sistema (colocación de cruces de San Andrés) y colocación de amarres a fachada.

### 1.3.3 Andamios de borriquetas

Los andamios de borriquetas están compuestos por bastidores ligeros y son fácilmente transportables, sobre los que se disponen plataformas continuas metálicas. Las borriquetas siempre se montarán niveladas horizontalmente, para evitar riesgos por trabajar sobre superficies inclinadas. En las figuras inferiores se representan las fotografías más significativas de un andamio de borriquetas (figura 1.3.4, 1.3.5 y 1.3.6).



Los apoyos de este andamio están realizados con perfiles circulares de acero a modo de caballete para sostener una plataforma normalmente metálica.



**Figura 1.3.4** Acopio de materiales sobre la plataforma de la borriqueta.



**Figura 1.3.5** Vista principal de un andamio de borriquetas



**Figura 1.3.6** Vista lateral de un andamio de borriquetas.

### 1.3.4 Andamios colgados



**Figura 1.3.7** Croquis de Andamio Colgado implantado

Los andamios colgados son andamios formados por plataformas horizontales suspendidas a un nivel variable (figura 1.3.7), con elementos en voladizo denominados pescantes, colgadas por medio de cables y dotados de mecanismos que permitan su izado (figura 1.3.8) y su frenado de forma que se puedan desplazar las plataformas verticalmente, y asegurarlas en su posición de trabajo en obra (figura 1.3.9) con sistemas de seguridad apropiadas.

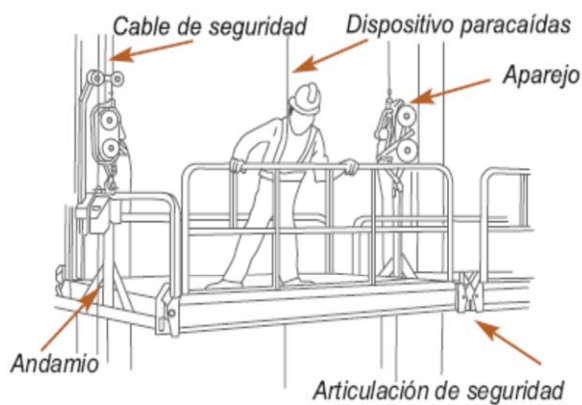


Figura 1.3.8 Elementos básicos de un andamio colgado.



Figura 1.3.9 Sistema de andamio colgado colocado en obra.

### 1.3.5 Andamios móviles



Figura 1.3.10 Operario trabajando en andamio móvil

Los andamios móviles están formados por pórticos, marcos y tubos unidos y arriostrados entre sí formando torres con cuatro caras verticales rígidas, unidas entre sí al menos por dos planos horizontales también rígidos, uno de los cuales suele ser la plataforma de trabajo, completamente cuajada y solidarizada con el resto del andamio (figura 1.3.10).

Los pies derechos están dotados de ruedas (figura 1.3.11) que permiten desplazamientos sin provocar deformaciones en la estructura. Si las cargas no superan los 25 N se pueden utilizar de goma,

si se superan estas cargas deben ser de acero. Las ruedas disponen de giro, calzos y frenos de forma que sea posible también su bloqueo.



**Figura 1.3.11 Andamio móvil con  
escalera incorporada**

Los desplazamientos de los andamios han de hacerse cuando estén vacíos y sin personal en la plataforma. El acceso (subida y bajada) a las plataformas del andamio debe hacerse a través de escaleras estables metálicas y seguras.

Los andamios están dotados de barandillas de seguridad normalmente a base de perfiles tubulares de acero circulares, a las cuatro caras de la plataforma de trabajo y dispondrán de escaleras y accesos seguros, normalmente mediante plataformas intermedias cada 2 m.

## 1.4 Estudios realizados acerca del comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero

### 1.4.1 Ensayos sobre postes pertenecientes a sistemas provisionales de protección de borde

González García, M<sup>a</sup>.N. (1) analizó tres sistemas provisionales de protección de borde con luz entre postes de 2400 mm y una altura de 1000 mm empleando como material, acero. Las barandillas principal e intermedia y el poste se resolvieron con perfiles tubulares de acero S235. En la tabla 1.4.1 se detallan las características geométricas de las secciones empleadas en los tres sistemas que fueron campo de su estudio (55):

Tabla 1.4.1 Características geométricas de los sistemas ensayados por González García, M<sup>a</sup>.N.

	SISTEMA 1 (S1)	SISTEMA 2 (S2)	SISTEMA 3 (S3)
Barandillas	Ø 25X1.5 mm	Ø 40X1.5 mm	Ø40X2 mm
Postes verticales	Ø 40X1.5 mm	□ 35X1.5 mm	Ø40X 2 mm
Rodapié	telescópico, fabricado en chapa metálica		

En la figura 1.4.1 se muestra la disposición de los sistemas de protección de borde ensayados.

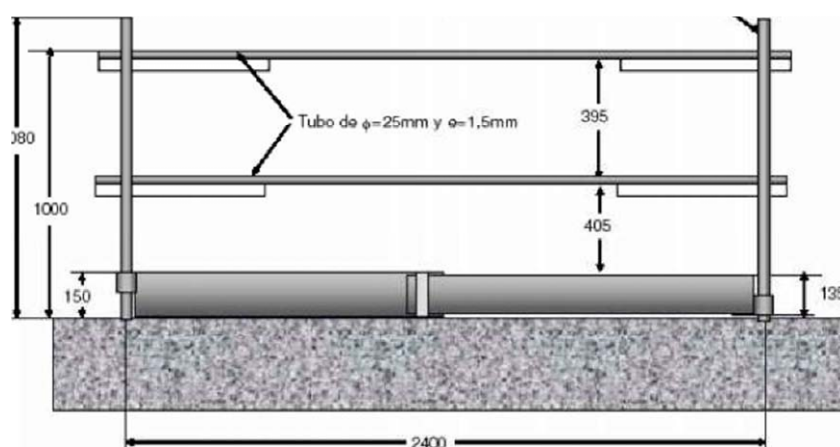


Figura 1.4.1 Características geométricas de los sistemas

Las dimensiones del primero de los sistemas estudiados son las empleadas habitualmente para la protección de bordes de forjado en obras de construcción. El segundo y tercer sistema se utilizan en ocasiones excepcionales.



Como método de ensayo se procedió a evaluar bajo carga de impacto con  $E = 180$  Julios sobre los principales elementos de los sistemas. En el caso de los postes a base de perfiles tubulares circulares de acero de dimensiones  $40 \times 1.5$  y  $30 \times 1.5$  que forman parte de estos sistemas de protección de borde, se realizó el ensayo aplicando cargas horizontales crecientes en sus extremos volados (figura 1.4.2).

Figura 1.4.2 Procedimiento de ensayo

En la figura 1.4.3 se muestran los diagramas carga-desplazamiento obtenidos los 2 postes que fueron ensayados a flexión de  $40 \times 1.5$  y  $30 \times 1.5$ .

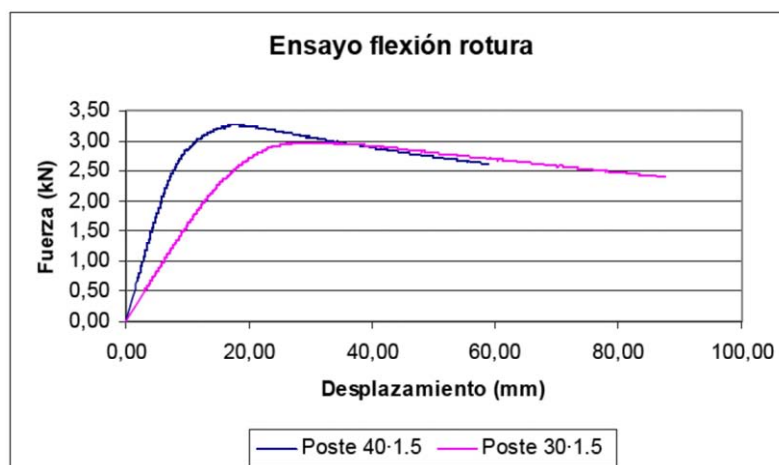


Figura 1.4.3 Diagramas carga-desplazamiento de los postes de acero aplicando cargas crecientes a sus extremos volados.

#### **1.4.1.1 Resultados generales**

El análisis de los diagramas carga-desplazamiento (56) de los postes 40-1.5 y 30-1.5 muestra un comportamiento más rígido hasta la máxima carga de ensayo del poste 40-1.5. Una vez alcanzada la máxima carga de ensayo, los postes experimentan una bajada en la resistencia hasta el final del ensayo.

Se destaca que no se produce un período de cedencia plástico después de alcanzar la carga máxima como podría ser previsible debido al comportamiento del acero. La diferencia se debe a que al alcanzar la máxima carga de ensayo y seguir deformando la pieza, se produce una modificación en la geometría de la sección más solicitada, produciéndose su abollamiento y disminuyendo el momento resistente y la inercia de la sección. Puede comprobarse como la abolladura de la sección implica una reducción del momento resistente de la sección.

En los casos que ha estudiado González García, M<sup>a</sup>.N. (54), la clasificación realizada por EC-3 de las secciones como clase 1 queda del lado de la inseguridad, tal como muestran los resultados de los ensayos que realizó. Los resultados muestran que el empleo del diagrama elastoplástico no es válido porque el sistema no es capaz de desarrollar la suficiente deformación plástica.

Adicionalmente ensayó a flexión en 3 puntos 5 tubos circulares de acero S235 de sección 40-2.0 usados como postes de sistemas de protección de borde. Los resultados obtenidos (figura 1.4.4) confirman que no pueden evaluarse este tipo de estructuras modelizándolas con un comportamiento elastoplástico. Una vez alcanzada la máxima carga de ensayo, los movimientos posteriores requieren menos carga y el colapso se produce para desplazamientos pequeños, absorbiendo una energía en el ensayo mucho menor de la que produce un comportamiento elastoplástico.



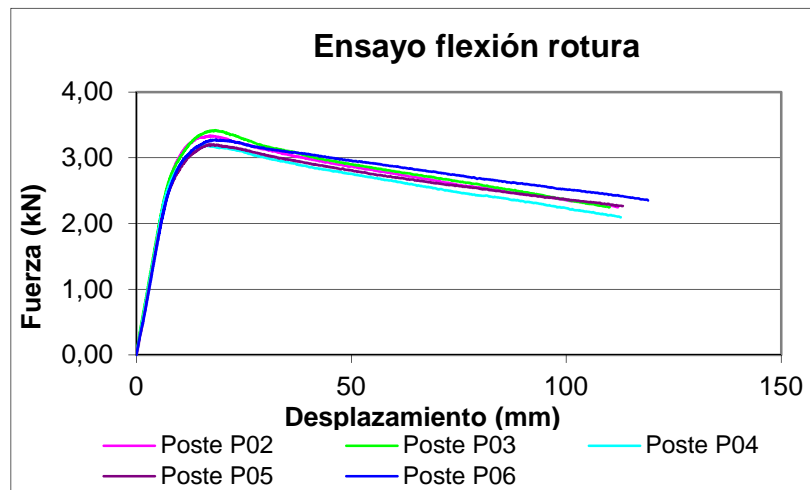


Figura 1.4.4 Comportamiento a flexión de tubos circulares de acero ensayados en tres puntos.

El ensayo realizado con estos tubos no reproduce la situación estructural de un poste, sin embargo el esquema de solicitaciones y tensiones es muy similar en ambos casos: la sección más desfavorable está solicitada por el máximo momento flector y el máximo cortante y la variación del momento flector a lo largo de la barra es lineal.

#### 1.4.1.2 Conclusiones

La mayoría de los sistemas de protección de borde utilizados habitualmente en obras no cumplen los requisitos exigidos por la norma UNE-EN 13374 cuando se evalúan analítica o experimentalmente. (57)

La clasificación de secciones de tubos de acero indicada por EC-3 o CTE-SE- EA quedan del lado de la inseguridad para los elementos estudiados en la tesis de González García, M<sup>a</sup>.N. (54). Los tubos de secciones 25-1.5, 40-1.5 o 30-1.5 no desarrollan movimientos significativos en régimen plástico, al producirse precisamente el abanamiento de su sección.

### 1.4.2 Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable

Real Saladrigas, E. (58) ha realizado un análisis del comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable biapoyadas obtenidos durante una campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

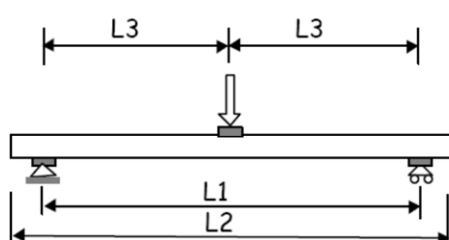


Figura 1.4.5 Idealización de las vigas

Realizó ensayos a flexión (figura 1.4.5 y 1.4.6) sobre seis vigas biapoyadas de secciones transversales (perfiles tubulares de acero) cuadradas y rectangulares conformadas en frío y secciones en H laminadas incluyendo la caracterización del material considerando los efectos del conformado.

La instrumentación que se llevó a cabo en las vigas ensayadas (tabla 1.4.2) permitió medir flechas en distintos puntos de las vigas con transductores de desplazamiento, deformaciones mediante galgas extensométricas y reacciones en apoyos con células de carga.

Para poder garantizar un mínimo de fiabilidad de los resultados, Real Saladrigas, E. (58) duplicó todos los ensayos, con lo que resultaron un total seis vigas.

Tabla 1.4.2 Geometría de las vigas ensayadas por Real Saladrigas, E. (58)

Viga	Luz L1 (mm)	Longitud L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	Canto h (mm)	Ancho b (mm)	Espesor t (mm)
SHS 80x80	1800	2000	900	-	80	80	3
RHS 80x120	2800	3000	1400	-	120	80	4
H 100x100	2400	2600	1200	-	100	100	8



### 1.4.2.1 Resultados generales

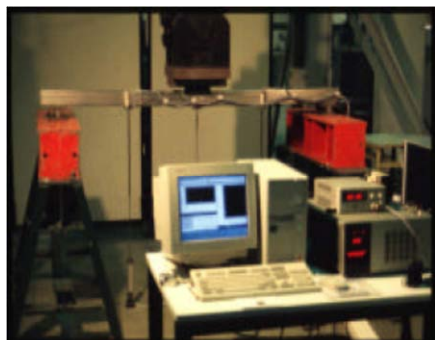


Figura 1.4.6 Vista general de los ensayos

Como análisis de los resultados obtenidos por Real Saladrigas, E. (58), para las vigas de acero inoxidable biapoyadas. La figura 1.4.7 muestra las curvas carga-flecha de la viga biapoyada SHS 80x80 de clase 4, calculadas según Eurocódigo 3, Parte 1-4 y los resultados de la curva experimental obtenida de los ensayos de la viga SHS 80x80-1.

En esta figura, la recta horizontal (Límite Elástico) marca el valor de la carga para la tensión (mediante un cálculo lineal elástico) en la fibra más solicitada alcanza el valor del límite elástico.

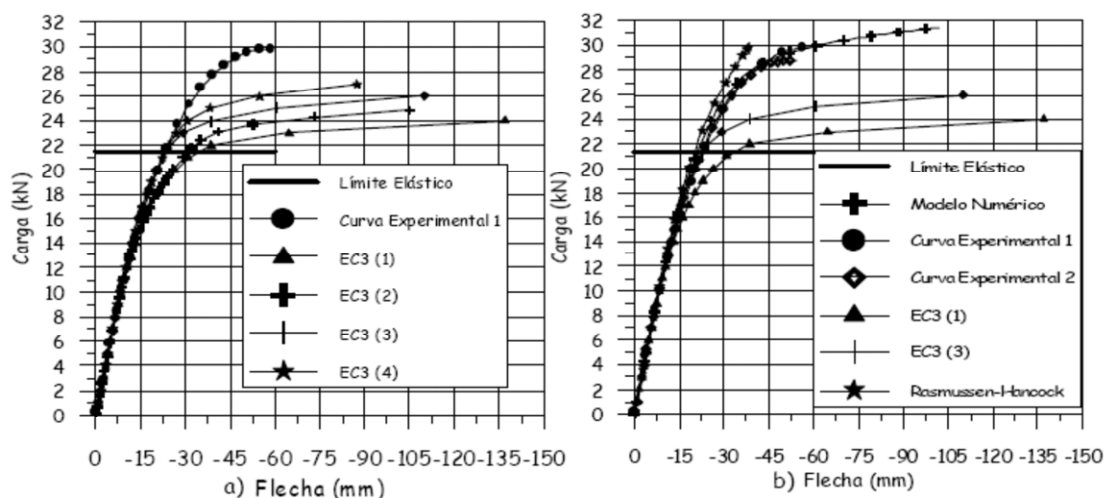


Figura 1.4.7 Curvas carga-flecha de la viga biapoyada SHS 80X80.

Tabla 1.4.3 Cálculos para la determinación de flechas

<b>CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FLECHAS</b>	
<b>EC3(1)</b>	Despreciando la variación del módulo de elasticidad ( $E_s$ ) a lo largo de la longitud del elemento, considerando la sección de apoyo intermedio y la sección transversal eficaz.
<b>EC3(2)</b>	Despreciando la variación del módulo de elasticidad ( $E_s$ ) a lo largo de la longitud del elemento, considerando sección de apoyo intermedio y la sección transversal total.
<b>EC3(3)</b>	Despreciando la variación del módulo de elasticidad ( $E_s$ ) a lo largo de la longitud del elemento, considerando la sección de aplicación de la carga y la sección transversal eficaz.
<b>EC3(4)</b>	Despreciando la variación del módulo de elasticidad ( $E_s$ ) a lo largo de la longitud del elemento, considerando la sección de aplicación de la carga y la sección transversal total.

Comparando las curvas (tabla 1.4.3) EC3 (1), EC3 (2), EC3 (3) y EC3 (4) se aprecia una gran diferencia en cuanto al uso de la sección eficaz. Lógicamente el efecto es importante dado que nos encontramos en presencia de una sección Clase 4.

Comparando las curvas EC3 (1 y 2) y EC3 (3 y 4), se aprecia la diferencia entre adoptar un único módulo de elasticidad secante correspondiente al valor de la máxima tensión o en adoptar el módulo de elasticidad correspondiente a cada sección.

Establece que la curva EC3 (3), que tiene en cuenta la sección eficaz y la variación de límite elástico secante a lo largo de la viga, es la más adecuada para comparar con los resultados experimentales.

En esta figura puede verse la buena relación existente entre los resultados del modelo numérico y los experimentales. Las pequeñas diferencias que se aprecian son debidas al hecho de que el elemento usado en

el modelo numérico es un elemento de viga que no tiene en cuenta los efectos de la abolladura local.

#### **1.4.2.2 Conclusiones**

Durante los ensayos de caracterización del material, Real Saladrigas, E. (59) evidenció claras diferencias entre los valores de las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas y los valores propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4. Estas diferencias son debidas a la influencia que ejerce el trabajado en frío de la chapa y el conformado de la sección sobre las propiedades mecánicas del material.

Durante los ensayos también se puso de manifiesto la respuesta no lineal de las estructuras de acero inoxidable, especialmente en aquellas situaciones en donde las estructuras se ven sometidas a tensiones próximas o superiores al límite elástico.

La aplicación del método simplificado de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), que considera un único valor del módulo de elasticidad secante a lo largo de todo el elemento, es recomendable para calcular flechas hasta valores de carga cercanos al 60% de la carga para la cual la tensión en la fibra más solicitada alcanza el valor del límite elástico. Sin embargo, para cargas superiores tiende a sobrestimar las flechas, dando lugar a un dimensionamiento claramente conservador frente al estado límite de servicio de deformaciones.

Real Saladrigas, E. (58) analizó la información obtenida por las galgas extensométricas colocadas que estudia el comportamiento de las secciones transversales de las vigas. Durante los primeros estados de carga las deformaciones de las secciones son planas y las distribuciones de tensiones son no lineales debido a la ecuación constitutiva del acero inoxidable. Posteriormente se apreció que la deformación en la sección deja de ser plana en el momento en que los efectos de la abolladura local son importantes.

## 2 Objetivos

Las protecciones colectivas o los medios auxiliares de edificación utilizan con frecuencia en su composición elementos con secciones tubulares de acero. En algunos casos, como las normas o documentos técnicos que regulan el análisis de protecciones colectivas o de medios auxiliares suponen que las secciones de acero de los elementos que los componen tienen posibilidad de plastificarse totalmente.

Por otra parte, con la clasificación de secciones indicada en EC-3 (con posibilidad de plastificarse y de realizar en las estructuras previas desvelan que este tipo de secciones no llega a plastificarse porque antes se abollan.

En este trabajo se pretende realizar un análisis de distintos tipos de secciones tubulares de acero para estudiar su comportamiento a flexión, comprobando sus posibilidades de plastificación.

Los objetivos que se pretenden obtener con este trabajo son:

1. Estudiar el comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero empleados usualmente en protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación.
2. Estudiar la influencia de la velocidad de carga y la esbeltez en el comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero.
3. Comprobar si la clasificación de secciones indicada por el Eurocódigo 3 o CTE DB SE-EA es válida para los perfiles tubulares de acero empleados usualmente en protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación.
4. Establecer que tipo de sección sería la correspondiente a los perfiles tubulares de acero empleados usualmente en protecciones colectivas y medios auxiliares.
5. Comprobar la modificación del comportamiento a flexión de perfiles tubulares de acero debido a su corrosión.

### 3 Materiales empleados y técnicas empleadas

Los perfiles tubulares de acero de los que se dispone pertenecen a las mismas calidades que los empleados en protecciones colectivas y medios auxiliares, ensayados en los laboratorios de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica (EUATM), perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Los ensayos realizados se han llevado a cabo sobre 36 perfiles tubulares de acero, adquiridos por la EUATM a la empresa SafeNet (60), dedicada a la implantación de métodos de seguridad en las obras de edificación y sobre 12 perfiles tubulares expuestos a la intemperie. Se han estudiado en total 48 perfiles tubulares de acero.

Para dar respuesta a los objetivos número 1 a 4 de este trabajo, se han estudiado perfiles tubulares de acero S235, conformados en frío, de sección circular y cuadrada, todos ellos de 1,20 metros de longitud (tabla 3.1).

1. Las secciones cuadradas estudiadas han sido la 40•40•2 y la 35•35•2.
2. Las secciones circulares estudiadas han sido la Ø40•2 y la Ø30•2.

Los aceros estructurales deben cumplir según el artículo 4.2.3 del CTE-DB-SE-A al menos:

Tabla 3.1 Propiedades del acero

Módulo de Elasticidad (E)	$200.000 N / mm^2$
Densidad	$7.850 K / m^3$

En este estudio no han sido realizados los ensayos para determinar el módulo de elasticidad longitudinal (E) (ASTM-E 111 y ASTM-A 370), por lo que se procederá en caso necesario a la utilización de los valores de la tabla anterior.

Este tipo de perfiles se emplea usualmente en protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación como por ejemplo elementos de sistemas provisionales de protección de borde, plataformas de descarga o andamios.

Para estudiar el objetivo número 5 se ha trabajado sobre perfiles tubulares de sección circular  $\varnothing 40 \bullet 2$ , que han estado en servicio de forma interrumpida durante 3 años en la sierra de Guadarrama expuestos a la intemperie como postes de sistemas de protección de borde. En la figura 3.1 se muestra la geometría de los diferentes perfiles utilizados. En la tabla inferior (tabla 3.2) se muestran los tipos de perfiles usados para este estudio.

Tabla 3.2 Número de perfiles tubulares utilizados por sección

	DIMENSIONES	NÚMERO DE PERFILES
SECCIÓN CUADRADA	40•40•2	9
SECCIÓN CUADRADA	35•35•2	9
SECCIÓN CIRCULAR	$\varnothing 40 \bullet 2$	9
SECCIÓN CIRCULAR	$\varnothing 30 \bullet 2$	9
SECCIÓN CIRCULAR	$\varnothing 40 \bullet 2$	12
	Total perfiles estudiados	48

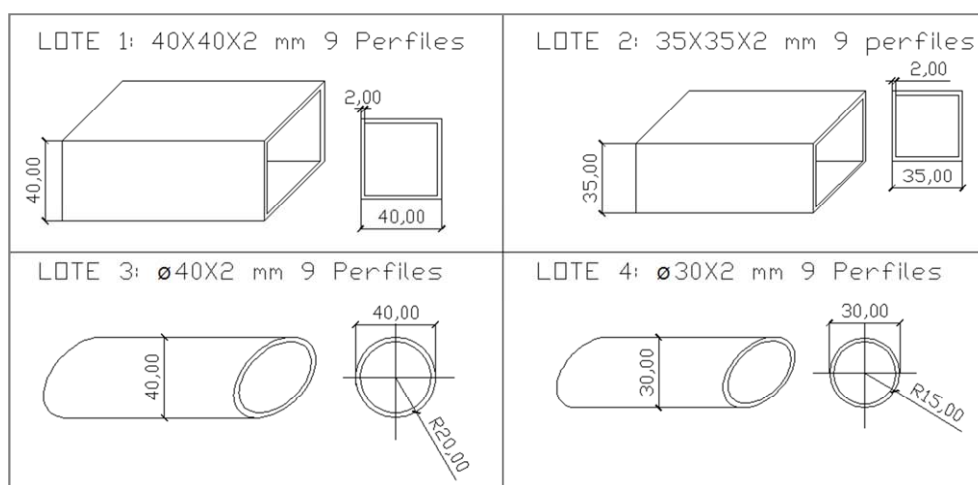


Figura 3.1 Representación de los perfiles tubulares empleados

Las relaciones canto/luz para los perfiles tubulares empleados son: (h/l)

- Sección 40•40•2:  $\frac{0.040}{1.20} = 0.033$
- Sección 35•35•2:  $\frac{0.035}{1.20} = 0.029$
- Sección Ø40•2:  $\frac{0.040}{1.20} = 0.033$
- Sección Ø30•2:  $\frac{0.030}{1.20} = 0.025$

Todos los valores están comprendidos entre 1/50 y 1/25. Las dimensiones nominales son las anteriormente descritas, siendo común el espesor de todos los lotes de 2 mm, aún así se procedió a pesar y a medir el espesor (tabla 3.3) con un calibre de cada uno de los perfiles como puede apreciarse en la figura inferior (figura 3.2). Además se calculó tomando el dato de la densidad, el espesor analítico teórico de cada uno de los perfiles tubulares de acero, encontrando variaciones en media de un 16,96% de diferencia entre el espesor medido y el analítico.



Figura 3.2 Medida con calibre

**Tabla 3.3 Cálculo de los espesores de los perfiles tubulares de acero**

CLASE	TUBO	PESO (gr)	ESPESOR Exp.(mm)	ESPESOR Analit.(mm)	DIF%	CLASE	TUBO	PESO(gr)	ESPESOR Exp.(mm)	ESPESOR Analit.(mm)	DIF %
Cuadrado 40x40x2	1	2307,30	1.75	1.59	9,14	Circular 40X2	19	1706,00	1.70	1.50	11,76
	2	2362,90	1.75	1.63	6,86		20	1790,20	2.00	1.57	21,50
	3	2292,20	2.00	1.58	21,00		21	1726,20	1.80	1.51	16,11
	4	2333,00	1.90	1.61	15,26		22	1718,40	1.75	1.51	13,71
	5	2354,10	1.90	1.63	14,21		23	1805,80	1.80	1.59	11,67
	6	2303,80	2.00	1.59	20,50		24	1693,60	1.90	1.49	21,58
	7	2538,10	2.00	1.76	12,00		25	1803,30	1.80	1.59	11,67
	8	2336,30	1.80	1.62	10,00		26	1715,30	2.00	1.51	24,50
	9	2337,70	1.90	1.62	14,74		27	1715,80	1.90	1.51	20,53
Cuadrado 35x35x2	10	1846,50	2.00	1.46	27,00	Circular 30X2	28	1220,80	1.80	1.44	20,00
	11	1845,40	2.00	1.46	27,00		29	1272,10	1.70	1.51	11,18
	12	1844,20	1.80	1.46	18,89		30	1233,70	1.85	1.46	21,08
	13	1845,50	1.80	1.46	18,89		31	1236,60	1.60	1.46	8,75
	14	1898,50	1.90	1.50	21,05		32	1274,50	1.80	1.51	16,11
	15	1904,10	2.00	1.51	24,50		33	1283,00	1.90	1.52	20,00
	16	1895,30	1.70	1.50	11,76		34	1238,10	1.85	1.47	20,54
	17	1836,00	1.80	1.45	19,44		35	1274,50	1.85	1.51	18,38
	18	1899,90	1.60	1.51	5,63		36	1223,00	1.90	1.45	23,68



## **4 Trabajo experimental y analítico realizado**

### **4.1 Trabajo experimental realizado**

El comportamiento a flexión se ha estudiado ensayando perfiles tubulares de acero en tres puntos a lo largo de su longitud, de este modo los elementos han estado sometidos simultáneamente a flexión y cortante, tal como es usual cuando forman parte de protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación.

#### **4.1.1 Diseño de los ensayos**

##### **4.1.1.1 Predimensionamiento**

Antes de proceder al ensayo de flexión, se procede a realizar un predimensionamiento de las posibles cargas máximas y flechas que se van a obtener durante el ensayo, para así conocer la fuerza que es necesario aplicar con la prensa universal, y la preparación de la instrumentación necesaria durante el proceso del ensayo.

##### **4.1.1.2 Apoyo sobre la prensa**

El apoyo de los perfiles tubulares de acero sobre la prensa a ensayar, se realiza con un apoyo móvil en uno de los extremos y un apoyo fijo en el lado opuesto para conseguir una estabilidad suficiente. En las figuras inferiores (figura 3.3 y 3.4) puede apreciarse uno de los perfiles colocados en la prensa durante la ejecución del ensayo.



**Figura 3.3 Ejecución de un ensayo**



**Figura 3.4 Apoyos de la prensa**

#### 4.1.1.3 Método de ensayo

Los perfiles tubulares de acero han sido sometidos a un ensayo a flexión normalizado para determinar su valor de carga de rotura.

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM perteneciente UPM, utilizando una máquina universal de ensayos marca IBERTEST, modelo MIB-60/AM que utiliza el software Wintest 32. (61) El control del ensayo en todos los casos ha sido por carrera.



Figura 3.5 Procedimiento de un ensayo con luz de 200 mm

Una vez designado y coordinado los distintos lotes de los que se disponen, se procede a limpiar con un paño la superficie de los perfiles para su colocación en la máquina para asegurar su perfecto contacto con la prensa.

Se insertan en la máquina de ensayo a flexión, colocando cada probeta sobre los dos rodillos que sirven de punto de

apoyo y se procede a accionar la máquina que comienza a ejercer una fuerza creciente en el punto medio del perfil tubular de manera creciente y continua hasta llegar al punto de rotura. En la figura 3.5 se presenta el ensayo a flexión de luz 200 mm ejecutado en un perfil tubular de sección cuadrada.

Una vez terminadas todas las probetas, se obtienen los datos más relevantes del proceso, en este caso la carga necesaria para su rotura a flexión. Para estudiar la posible influencia de la velocidad de carga en el comportamiento a flexión, se han utilizado en todos los tipos de perfiles tres velocidades distintas de carga: 300 milímetros por minuto (mm/min) 150 mm/min y 30 mm/min.

Para evaluar la influencia de la esbeltez de la pieza en el comportamiento a flexión, los ensayos se han realizado con distintas relaciones luz entre apoyos y canto de la sección (esbeltez). En concreto se han utilizado en todos los tipos de perfil luces entre apoyos de 1000 mm, 400mm y 200 mm. En la figura 3.5 se observan las distintas relaciones de luz entre apoyos.

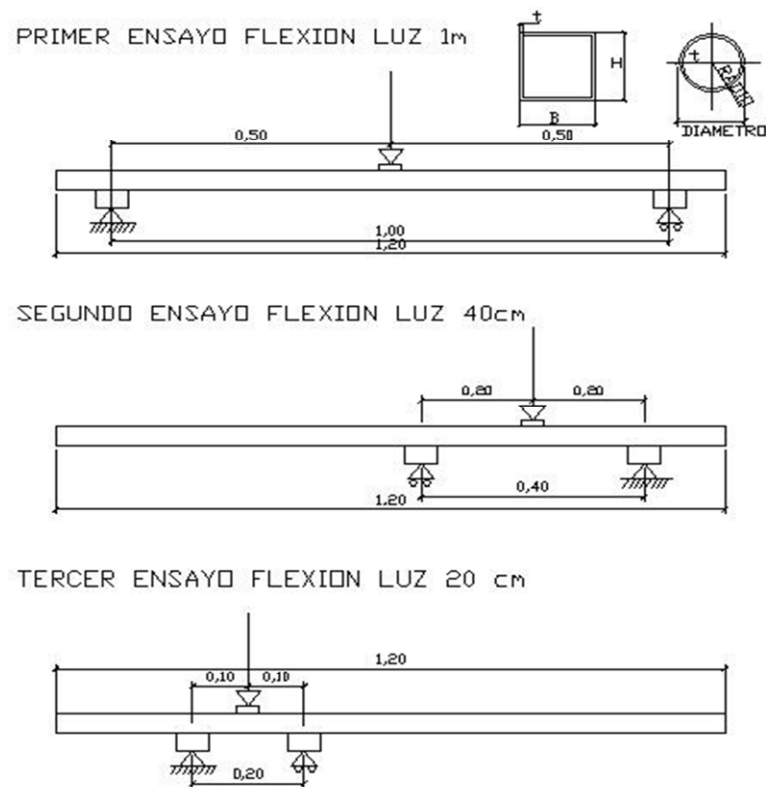


Figura 3.6 Distintas relaciones de luz entre apoyos ensayados.

Como resultado del ensayo a flexión se han podido obtener los siguientes datos:

1. Carga en el límite elástico.
2. Carga de rotura.
3. Desplazamiento en el límite elástico.
4. Desplazamiento para la carga máxima.
5. Desplazamiento último.
6. Energía hasta la carga máxima y energía total.
7. Resistencia a flexotracción
8. Diagrama carga-desplazamiento (permite indicar si la forma de rotura es frágil o dúctil y las posibilidades de plastificación)

## 4.2 Trabajo analítico realizado

El modelo de cálculo se puede idealizar para los ensayos a flexión realizados según muestra la figura 3.6:

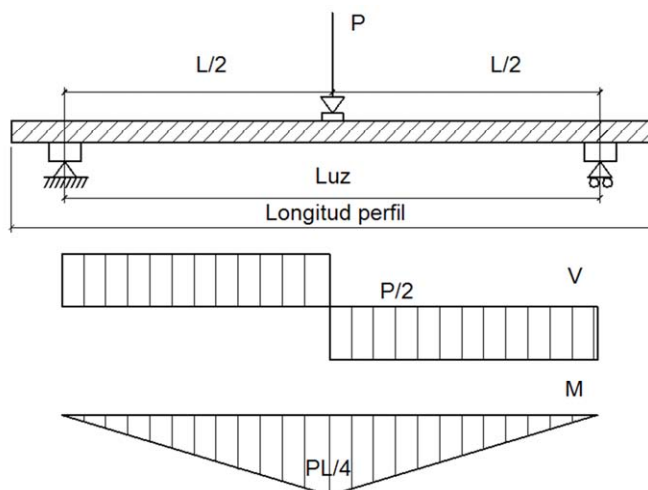


Figura 3.6 Modelo de cálculo

Donde  $P$  es la carga aplicada en el centro del vano.  $L$  es la luz de la viga y  $V$  y  $M$  se corresponden con el diagrama de cortantes y de momentos flectores respectivamente.

En todos los perfiles tubulares ensayados, la sección central sometida simultáneamente al máximo momento flector ( $PL/4$ ) y al máximo cortante ( $P/2$ ) es la más solicitada. En la figura 3.7 se muestra la colocación del perfil en la máquina durante el ensayo. Las acciones y la resistencia ante las que se encuentra esta sección son las que vienen indicadas en la tabla inferior (tabla 3.4).



Figura 3.7 Sección más solicitada

Tabla 3.4 Solicitaciones en la sección central

SOLICITACIÓN	ACCIONES	RESISTENCIA DE LA SECCIÓN DE ACERO
Flexión	$M_S = \frac{P \cdot L}{4}$	$M_R = W \cdot f_y$
Cortante	$V_S = \frac{P}{2}$	$V_R = A_v \cdot f_y / \sqrt{3}$

El Eurocódigo 3 y el CTE admiten que para secciones tipo 1 y 2 (Plástica y compacta) la determinación de la resistencia de las mediante el cálculo plástico mientras que para las secciones tipo 3 (Elástica) el método de cálculo será el elástico. La distribución de tensiones es la siguiente (figura 3.8):

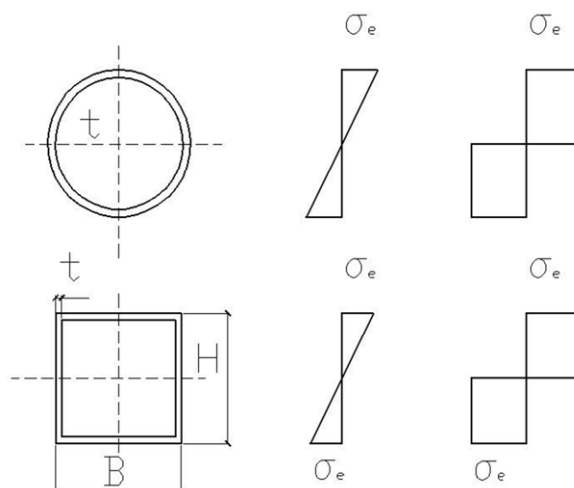


Figura 3.8 Distribución de tensiones de los perfiles tubulares de acero

#### 4.2.1 Clasificación de las secciones

El cálculo de elementos de acero se realiza siguiendo los pasos indicados por el Eurocódigo 3 (31) donde se indica que para la obtención de la resistencia de una sección se debe proceder previamente a su clasificación (tabla 3.5).

Tabla 3.5 Momentos resistentes a considerar en función de la clase de sección

Clase	1 y 2	3	4
W	Plástico ( $W_{pl}$ )	Elástico ( $W_e$ )	Elástico eficaz ( $W_{eff}$ )

La clasificación de secciones para perfiles tubulares circulares se establece comparando el cociente entre el diámetro exterior (d) y el espesor del tubo t con el parámetro de abolladura ( $\epsilon$ ), de manera análoga para secciones rectangulares (tabla 3.6), se compara el cociente entre su lado (c) y el espesor del tubo t también con el parámetro de abolladura ( $\epsilon$ ) cuya expresión viene definida por la siguiente expresión (ecuación 3.1):

Ecuación 3.1 Parámetro de abolladura

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Siendo,  $f_y$  el límite elástico del acero empleado, en N/mm<sup>2</sup>.

Tabla 3.6 Clasificación para secciones rectangulares y circulares

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Tipo de perfil
$d/t \leq$	$50 \epsilon^2$	$70 \epsilon^2$	$90 \epsilon^2$	Circular
$c/t \leq$	$72 \epsilon^2$	$83 \epsilon^2$	$124 \epsilon^2$	Rectangular

En la tabla 3.6 se establecen las comparaciones a realizar con el parámetro de abolladura para la clasificación de las secciones. Después de realizar todos los cálculos pertinentes para cada ensayo y luz, todos los perfiles tubulares estudiados en este trabajo (tanto los perfiles tubulares adquiridos como los perfiles expuestos a la intemperie) pertenecen a la clase 1 (además con bastante holgura). Los cálculos necesarios para la realización de la clasificación de las secciones se encuentran en el anexo 2.

#### 4.2.2 Métodos de cálculo de Momento último

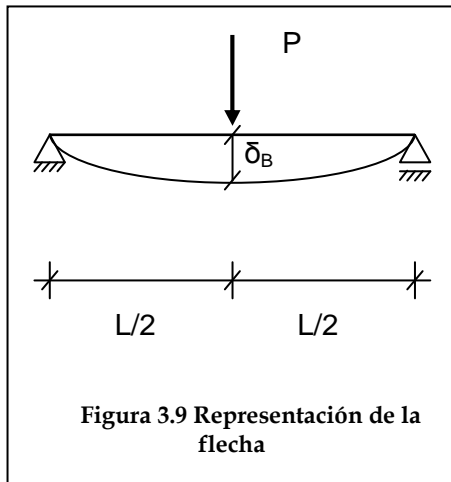
En la tabla 3.7 se presenta a modo de esquema el conjunto de cálculos necesarios de realizar para el estudio de los momentos últimos tanto en estado elástico como en estado plástico que se han efectuado en todos los perfiles tubulares de acero que comprenden este trabajo. Para más información de cómo se han realizado los cálculos en el apartado 5.2 se presenta un ejemplo numérico de cálculo para un perfil tubular específico.

Tabla 3.7 Método de cálculo para momentos últimos

	CÁLCULO EXPERIMENTAL	CÁLCULO ANALÍTICO, MOMENTO ÚLTIMO $M_u$		
ELÁSTICO	$M_{ue} = \frac{(P_e \cdot L)}{4}$	$M_{ue} = W_e \cdot f_y$		$R_e$ : Radio exterior $R_i$ : Radio interior
		Para secciones Circulares: $W_e = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{(R_e^4 - R_i^4)}{R_e}$	Para secciones rectangulares: $W_e = \frac{I_x}{y_{máx}}$	A: Área de la sección $W_{pl}$ : Módulo resistente plástico de la sección $W_e$ : Módulo resistente elástico de la sección
PLÁSTICO	$M_{up} = \frac{(P_{pl} \cdot L)}{4}$	$M_{up} = W_{pl} \cdot f_y$		$y_{G1}$ : Distancia del centro de gravedad de la parte superior de la sección a la línea media
		Para tubos Circulares: $W_{pl} = \frac{4}{3} \cdot \frac{(R_e^4 - R_i^4)}{R_e}$	Para tubos rectangulares: $W_{pl} = \frac{A}{2} \cdot (y_{G1} + y_{G2})$ $y_{G1} = y_{G2} = \frac{L^2 - l^2}{4 \cdot (L - l^2)}$	$y_{G2}$ : Distancia del centro de gravedad de la parte inferior de la sección a la línea media $I_x$ : Momento de inercia de la sección respecto del eje que pasa por el centro de gravedad $y_{máx}$ : Distancia de la fibra más alejada hasta la línea neutra

#### 4.2.3 Cálculo de la flecha

La flecha  $\delta_b$ , (figura 3.9) dentro del régimen elástico y lineal, se puede obtener a partir de la siguiente expresión (ecuación 3.2):



Ecuación 3.2 Cálculo de flecha

$$\delta_B = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x}$$

Siendo  $I_x$  la inercia del perfil, P la carga en el punto medio del vano y E el modulo de elasticidad longitudinal del metal que se adoptará  $200.000 N/mm^2$ .

#### 4.2.4 Cálculo de Inercias

El cálculo de Inercias se realiza mediante las fórmulas recogidas en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Cálculo de inercias para perfiles tubulares de acero

CÁLCULO ANALÍTICO EN ESTADO ELÁSTICO DE FLECHA		$R_e$ : Radio exterior $R_i$ : Radio interior $I_x$ : Momento de inercia de la sección respecto del eje que pasa por el centro de gravedad
SECCIONES CIRCULARES	$I_x = \frac{\pi}{4} (R_e^4 - R_i^4)$	
SECCIONES RECTANGULARES	$I_x = \frac{1}{12} \cdot (L^4 - l^4)$	

#### 4.2.5 Ductilidad: Cálculo de energía por deformación

Las energías por deformación que se van a calcular en este trabajo serán 3 (figura 3.10, 3.11 y 3.12), las correspondientes a la zona elástica (energía elástica), carga máxima (energía máxima) y por último carga de rotura (energía total). En la ecuación 3.3 se muestra el índice de ductilidad.



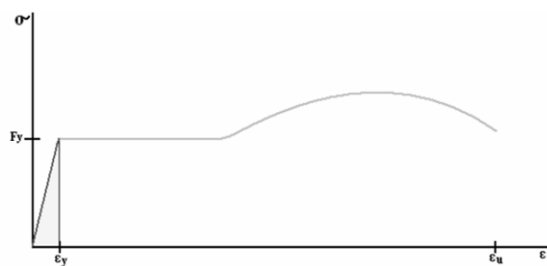


Figura 3.10 Energía elástica

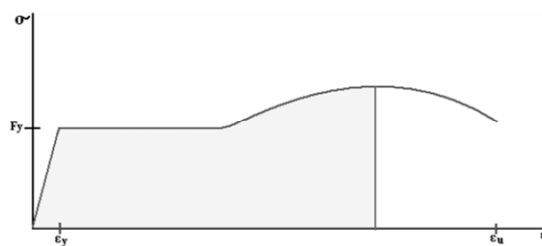


Figura 3.11 Energía correspondiente a la carga máxima

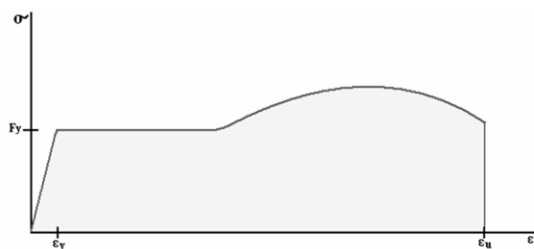


Figura 3.12 Energía última

Ecuación 3.3 Índice de ductilidad

$$D_d = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$$

$D_d$  = Índice de ductilidad por deformación

$\epsilon_u$  = Deformación unitaria de rotura

$\epsilon_y$  = Deformación unitaria de inicio de fluencia

El proceso operatorio a seguir para la obtención de las diferentes energías se basa en el cálculo del área que queda encerrado por el diagrama de carga-desplazamiento y esta área obtenida se relaciona con la ductilidad del acero, a modo ilustrativo se presenta el cálculo en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Proceso operatorio para el cálculo de energías por deformación

P(carga)	F (fuerza)	$(F_N - F_{N-1})$	$(F_N - F_{N-1}) \cdot P_{N-1}$
$P_1$	$F_1$		
$P_2$	$F_2$	$(F_2 - F_1)$	$(F_2 - F_1) \cdot P_1$
$P_3$	$F_3$	$(F_3 - F_2)$	$(F_3 - F_2) \cdot P_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$P_e$	$F_e$		$Energía = \sum (F_N - F_{N-1}) \cdot P_{N-1}$

## 5 Resultados obtenidos

### 5.1 Resultados experimentales

Se han realizado 144 ensayos a flexión, de los cuales 108 han sido realizados sobre 36 perfiles tubulares de acero de sección cuadrada y circular variando la velocidad de carga y la luz de las piezas. En la tabla 5.1 se indica por cada tipo de sección (40•40•2; 35•35•2; Ø40•2 y Ø30•2) el número de ensayos realizados.

Tabla 5.1 Número de ensayos realizados por sección.

Velocidades	1000 mm	400 mm	200 mm
300 mm/min	3	3	3
150 mm/min	3	3	3
30 mm/min	3	3	3

Se han realizado 36 ensayos a flexión, sobre 12 perfiles tubulares de acero expuestos durante 3 años a la intemperie, de sección circular Ø40•2, variando la velocidad de carga y la luz de las piezas. En la tabla 5.2 se indican por cada tipo de sección el número de ensayos realizados sobre este tipo de perfiles.

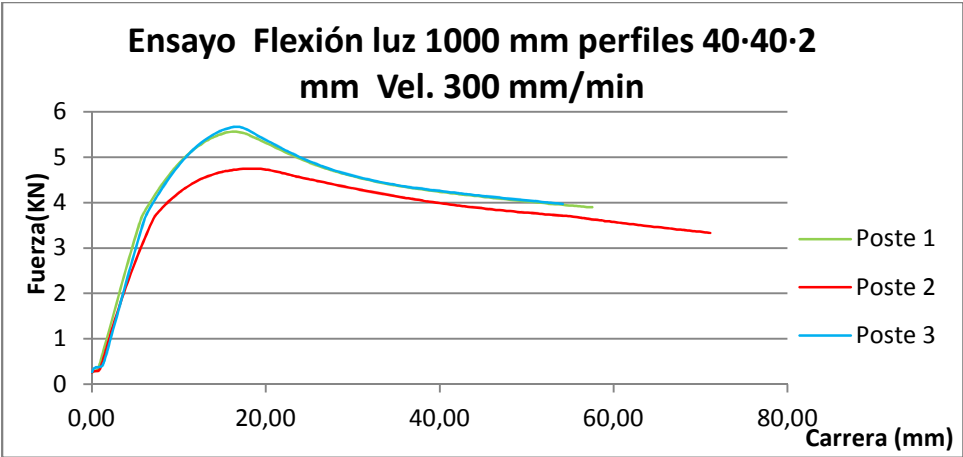
Tabla 5.2 Número de ensayos realizados en perfiles expuestos a la intemperie.

Velocidades	1000 mm	400 mm	200 mm
300 mm/min	4	4	4
150 mm/min	4	4	4
30 mm/min	4	4	4

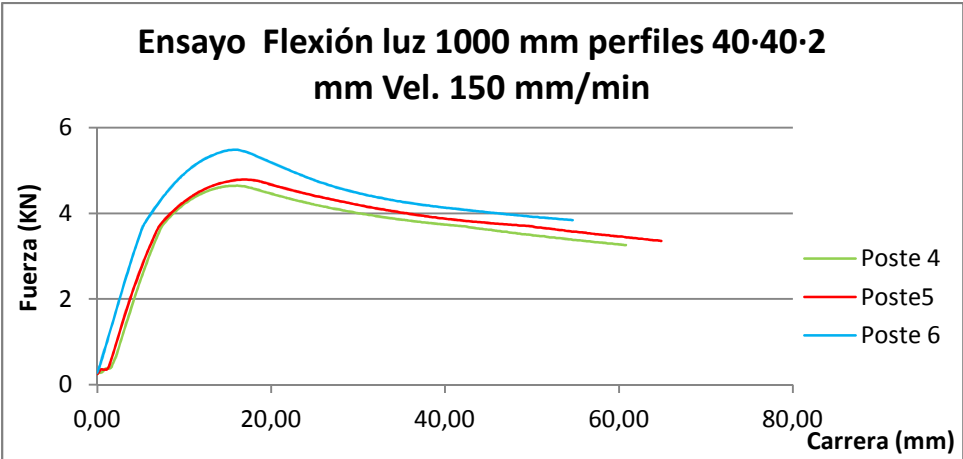
Una vez finalizados todas las series de ensayos a flexión para las distintas secciones de perfiles tubulares se ha procedido a representar los resultados obtenidos en la sección cuadrada 40•40•2 mm, que se muestra en la gráfica 5.1 cuando la separación entre apoyos es 1000 mm y la velocidad del ensayo es 300 mm/min. Las gráficas 5.2 y 5.3 representan los diagramas carga-desplazamiento correspondientes a las velocidades de ensayo de 150

mm/min y 30 mm/min para la misma sección y luz de 1000 mm. Los resultados de las cargas de rotura y desplazamiento para todos los perfiles estudiados se encuentran en el Anexo 3.

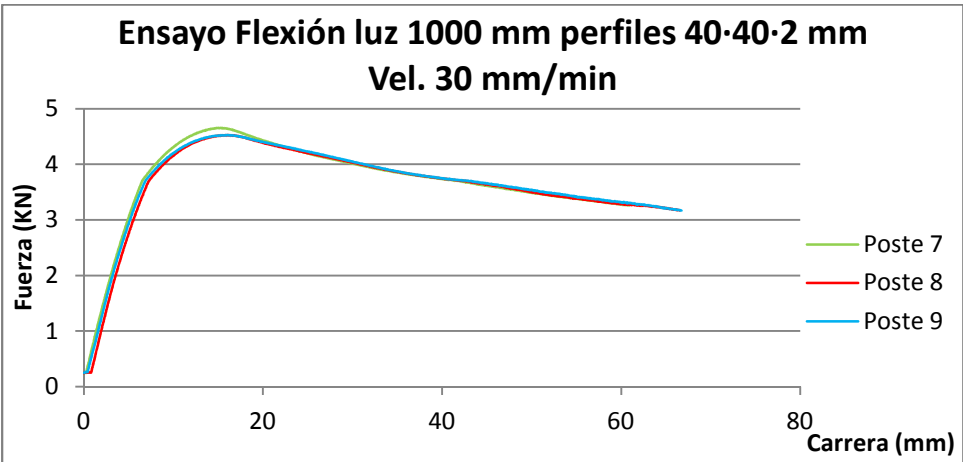
Gráfica 5.1 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 5.2 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

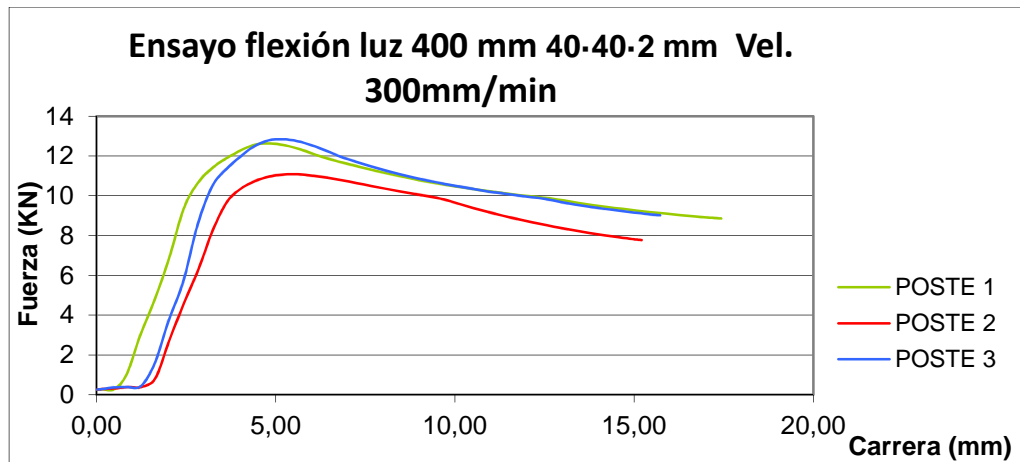


Gráfica 5.3 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 30 mm/min.

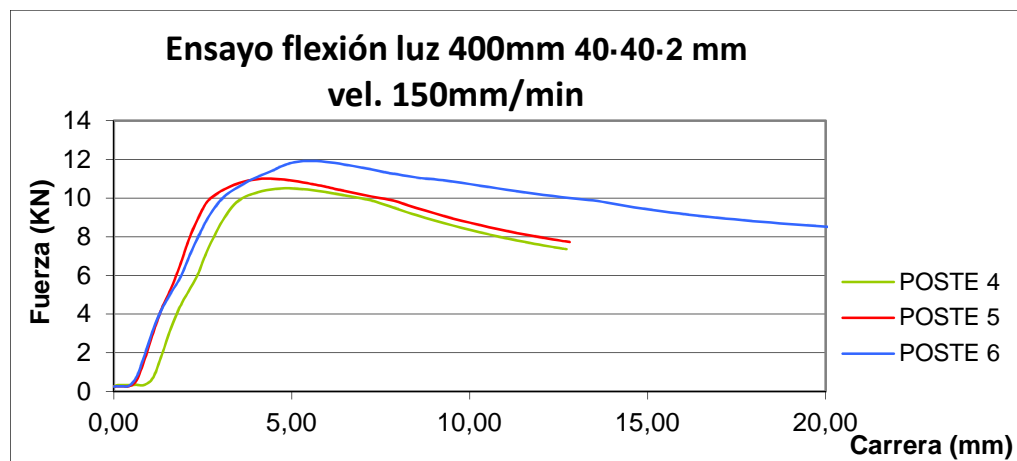


A continuación se procede a presentar los diagramas carga-desplazamiento para una luz de 400 mm de perfiles con sección 40•40•2 mm. Las gráficas 5.4, 5.5 y 5.6 representan los diagramas carga-desplazamiento correspondientes a las velocidades de ensayo de 300 mm/min 150 mm/min y 30 mm/min para la misma sección y luz de 400 mm.

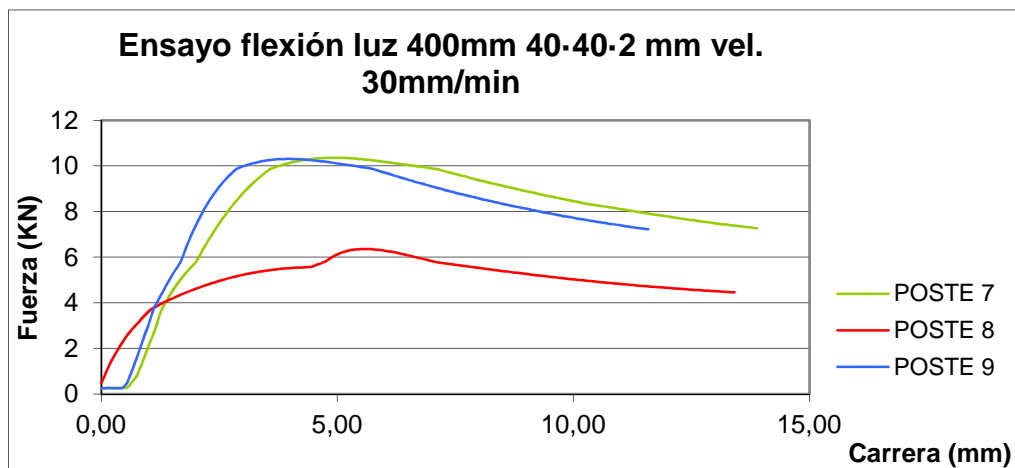
Gráfica 5.4 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400 mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 5.5 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400 mm y velocidad 150 mm/min.

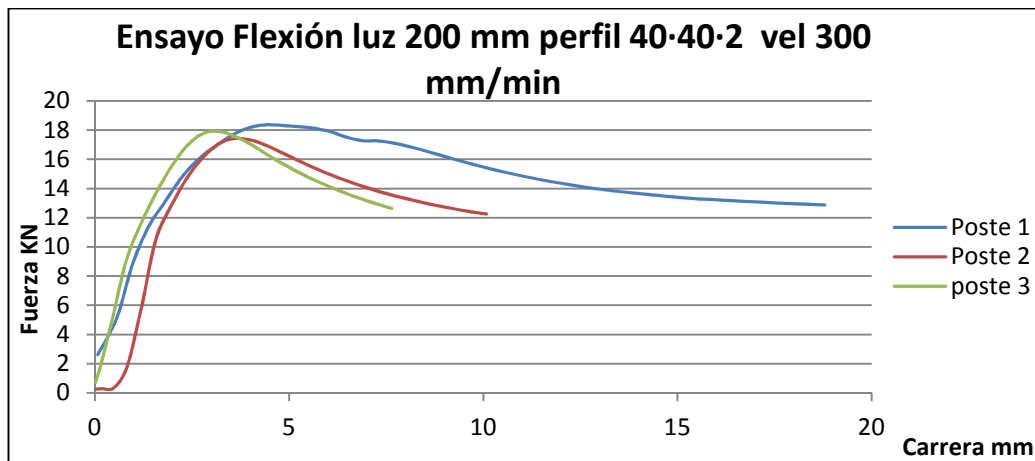


Gráfica 5.6 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 30 mm/min.

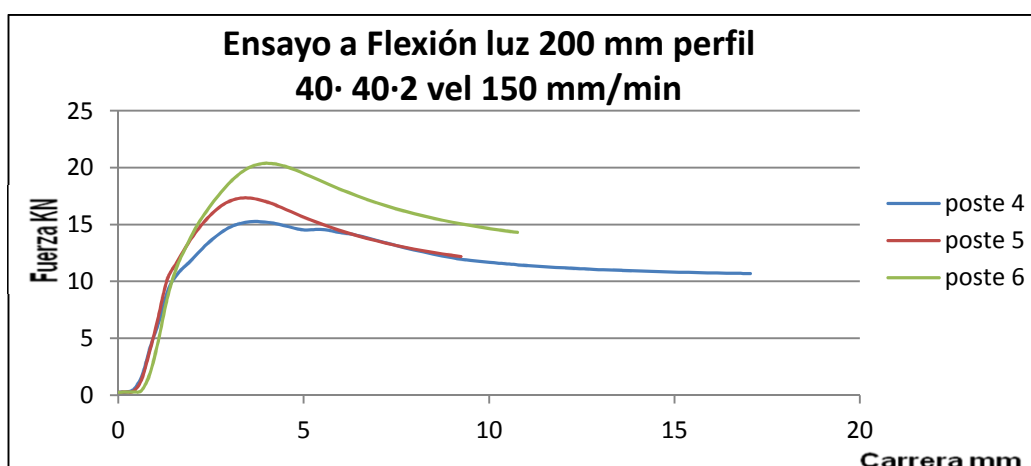


Por último se procede a presenten los diagramas carga-desplazamiento para una luz de 200 mm de perfiles con sección 40•40•2 mm. Las gráficas 5.7, 5.8 y 5.9 representan los diagramas carga-desplazamiento correspondientes a las velocidades de ensayo de 300 mm/min 150 mm/min y 30 mm/min para la misma sección y luz de 200 mm.

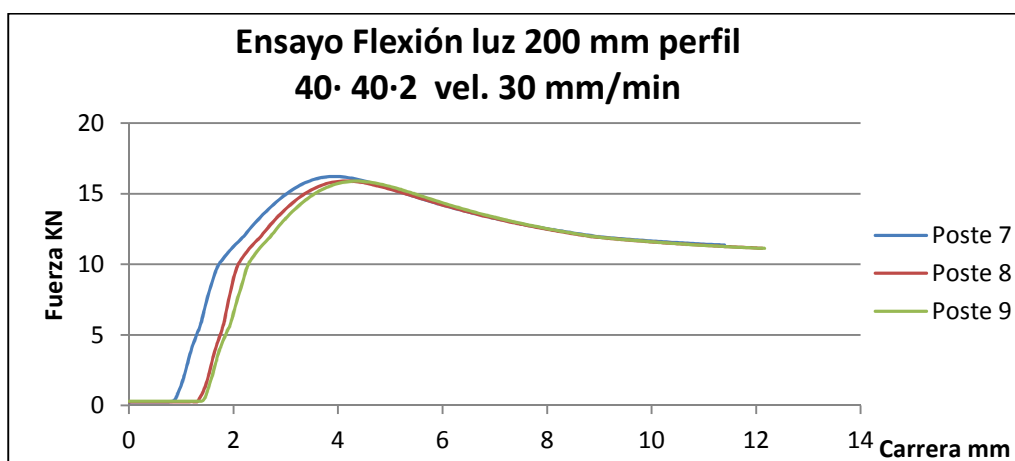
Gráfica 5.7 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400 mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 5.8 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400 mm y velocidad 150 mm/min



Gráfica 5.9 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 30 mm/min.



El resto de los diagramas carga-desplazamiento para las diferentes secciones de perfiles tubulares estudiados son similares a los aquí mostrados y se presentan en el Anexo 4.

A partir de los gráficos de cada perfil ensayado se pueden obtener los resultados reflejados en la tabla 5.3 para la sección 40-40-2 mm luz y luz de 1000 mm.

Donde  $P_e$  es el valor de la carga en el límite elástico en KN;  $P_{max}$  es el valor de la carga máxima en KN;  $f_e$ , es el valor de la flecha correspondiente a la carga en el límite elástico en mm;  $F_{max}$  es el valor de la flecha correspondiente a la carga máxima en mm;  $F_u$ , es el valor obtenido de la flecha alcanzada a la finalización del ensayo en mm;  $E_e$ ,  $E_{max}$  y  $E_u$  son las energías correspondientes

a la carga en el límite elástico, máxima, y en el momento de la finalización del ensayo expresadas en Julios.

Con los datos obtenidos de los distintos ensayos de flexión para la sección 40•40•2 mm, luz de 400mm se ha confeccionado la tabla 5.4 y tabla 5.5 para la luz de 200 mm en la que se han calculado los mismos parámetros que en la tabla 5.3. Los datos obtenidos de los ensayos de flexión se calculan del mismo modo para todos los tipos de secciones estudiadas y se presentan en el Anexo 5.

Tabla 5.3 Resultados obtenidos en el ensayo a flexión 40•40•2 con luz de 1000 mm.

Luz 1000 mm 40*40*2 mm	Vel.	Tub	P <sub>e</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>e</sub> (mm)	f <sub>max</sub> (mm)	f <sub>u</sub> (mm)	E <sub>e</sub> (J)	E <sub>max</sub> (J)	E <sub>u</sub> (J)
	300 mm/min	P1	3,66	5,57	5,68	16,18	57,55	8,20	58,40	245,00
		P2	3,66	5,67	5,68	18,20	71,11	12,00	59,60	270,00
		P3	3,66	4,75	6,10	16,59	54,15	8,33	59,10	231,00
	150 mm/min	P4	3,61	4,64	7,21	16,16	60,80	11,60	50,30	221,00
		P5	3,53	4,79	6,70	16,92	64,86	11,20	56,00	245,00
		P6	3,75	5,48	5,42	16,16	54,67	10,80	63,30	233,00
	30 mm/min	P7	3,18	4,65	5,31	15,16	60,90	9,18	50,75	226,50
		P8	3,17	4,53	5,92	16,02	66,53	9,48	51,41	241,40
		P9	3,56	4,53	6,48	16,17	66,73	12,49	53,66	244,52

Tabla 5.4 Resultados obtenidos en el ensayo a flexión con luz 400 en 40•40•2.

Luz 400 mm 40*40*2 mm	Vel.	Tub	P <sub>e</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>e</sub> (mm)	f <sub>max</sub> (mm)	f <sub>u</sub> (mm)	E <sub>e</sub> (J)	E <sub>max</sub> (J)	E <sub>u</sub> (J)
	300 mm/min	P1	10,69	12,62	2,85	4,86	17,43	10,40	34,10	165,00
		P2	9,71	11,08	3,65	5,63	15,21	9,70	30,70	122,00
		P3	10,45	12,85	3,22	5,20	15,72	8,38	31,80	144,00
	150 mm/min	P4	9,03	10,51	3,12	4,94	12,72	9,74	27,94	98,27
		P5	9,76	11,00	2,60	4,42	12,81	9,68	28,80	108,19
		P6	9,73	11,92	2,93	5,45	21,23	11,98	39,80	197,17
	30 mm/min	P7	8,37	10,36	2,82	4,95	13,89	10,57	31,49	110,19
		P8	3,55	6,36	0,97	5,51	13,41	2,10	25,53	67,01
		P9	8,99	10,31	2,47	3,99	11,58	9,75	24,95	91,60

Tabla 5.5 Resultados obtenidos en el ensayo a flexión con luz 200 en 40•40•2.

Luz 200 mm 40*40*2 mm	Vel.	Tub	P <sub>e</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	f <sub>e</sub> (mm)	f <sub>max</sub> (mm)	f <sub>u</sub> (mm)	E <sub>e</sub> (J)	E <sub>max</sub> (J)	E <sub>u</sub> (J)
	300 mm/min	P1	13,06	18,36	5,00	7,58	21,99	13,05	54,36	273,22
		P2	12,83	17,42	1,97	3,60	10,08	7,24	32,06	127,16
		P3	13,75	17,90	1,59	3,23	7,64	10,60	36,97	104,49
	150 mm/min	P4	10,75	15,27	1,623	3,684	17,05	5,81	33,35	197,27
		P5	10,1	17,34	1,311	3,364	9,24	2,97	32,36	117,99
		P6	14,63	20,36	2,075	4,132	10,77	10,10	47,38	159,67
	30 mm/min	P7	13,53	16,23	2,564	3,937	11,40	14,17	35,13	133,56
		P8	12,85	15,90	2,718	4,194	12,11	10,89	32,83	134,77
		P9	12,5	15,89	2,821	4,348	12,16	10,58	33,05	133,58

En la tabla 5.3 se aprecia que los resultados para las cargas en el límite elástico, cargas máximas, flechas y energías tienen un comportamiento similar. En la tabla 5.4 se observa que el perfil tubular número 8 ha tenido una carga máxima de 6,36 KN bastante inferior a la carga obtenida en los demás perfiles ensayados para una luz de 400 mm. En la tabla 5.5 se puede percibir gran variabilidad en los datos obtenidos en todos los campos para una luz de 200 mm, por ejemplo mientras el perfil tubular número 6 logra 20,36 KN de carga máxima, el perfil 9 solo obtiene 15,89 KN.

## 5.2 Obtención analítica

Como método de cálculo se realiza el que muestra el EC 3 y el CTE-DB-A. Los métodos a emplear para el cálculo de cada momento último de los perfiles tubulares de acero se indican en la tabla 3.7 tanto en cálculo experimental como en cálculo analítico y en la tabla 3.8 se muestra el cálculo analítico elástico de flechas. A modo de ejemplo, se presenta el cálculo del perfil tubular número 1, para mostrar el procedimiento de cálculo, siendo igual para todos los demás perfiles estudiados. Los resultados de éstos cálculos han servido para confeccionar las tablas de los siguientes epígrafes.



### 5.2.1 Cálculo de momentos últimos

El perfil tubular a calcular es el numerado como 1, es de sección rectangular de 40·40·2 mm de acero S235, ensayado para una luz de 1000 mm. Los datos de los que se dispone son los obtenidos del ensayo de flexión  $P_e=3,658 \text{ KN}$   $P_l=5,566 \text{ KN}$

**Cálculo analítico en estado Elástico Momento último:**

$$W_e = \frac{I_x}{y_{\max}}$$

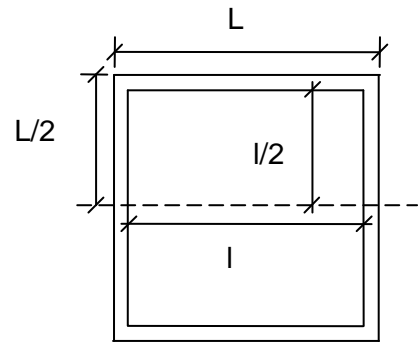
$$I_x = \frac{1}{12}(L^4 - l^4)$$

$$I = \frac{1}{12}(40^4 - 36^4) = 73365,33 \text{ mm}^4$$

$$W_e = \frac{73365,33}{20} = 3668,267$$

$$Mu_e = W_e \cdot f_y$$

$$Mu_e = 3668,267 \cdot 235 = 1391408,500 \text{ Nmm}$$



**Cálculo analítico en estado Plástico Momento último:**

$$W_{pl} = \frac{A}{2} \cdot (y_{G1} + y_{G2})$$

$$y_{G1} = \frac{L^3 - l^3}{4 \cdot (L^2 - l^2)}$$

$$y_{G1} = \frac{40^3 - 36^3}{4 \cdot (40^2 - 36^2)} = 14,26 \text{ mm}$$

$$W_{pl} = \frac{(40 \cdot 40) - (36 \cdot 36)}{2} \cdot (14,26 + 14,26) = 4336 \text{ mm}^3$$

$$Mu_p = W_{pl} \cdot f_y$$

$$Mu_p = 4336 \cdot 235 = 1018960 \text{ Nmm}$$

**Cálculo experimental en estado Elástico Momento último:**

$$Mu_e = \frac{(P_e \cdot L)}{4}$$

$$Mu_e = \frac{(3,658 \cdot 1000 \cdot 1000)}{4} = 914497,500 Nmm$$

**Cálculo experimental en estado Plástico Momento último:**

$$Mu_p = \frac{(P_{pl} \cdot L)}{4}$$

$$Mu_p = \frac{(5,566 \cdot 1000 \cdot 1000)}{4} = 1018960 Nmm$$

**Cálculo analítico en estado elástico de la flecha:**

$$E = 200.000 \text{ N/mm}^2$$

$$\delta_B = \frac{P_e \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$\delta_B = \frac{3,658 \cdot 1000 \cdot 1000^3}{48 \cdot 200.000 \cdot 73365,333} = 5,194 mm$$

De manera análoga a lo anteriormente descrito, una vez finalizados los cálculos correspondientes a los 144 ensayos, se procede a efectuar las tablas con los contenidos. En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos experimentalmente y calculados para la sección rectangular 40•40•2 mm para una luz de 1000 mm, la misma sobre la que se ha reflejado a lo largo de este capítulo. El resto de cálculos para las demás secciones y luces se realizan de la misma manera, por ello se muestra en el Anexo 6.

En la tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos de cálculo de flechas y momentos últimos de la sección 40•40•2 mm para una luz de 1000mm.

**Tabla 5.6 Flechas y momentos últimos para la sección 40•40•2 mm y luz 10000 mm.**

Tubos	P <sub>e</sub> (kN)	P <sub>pl</sub> (kN)	f <sub>e</sub> (mm)	Inercia (mm <sup>4</sup> )	f <sub>e</sub> (mm) Analítica	M <sub>ue</sub> (Nmm) Experimen.	M <sub>upl</sub> (Nmm) Experimen.	W <sub>e</sub> (mm <sup>3</sup> )	M <sub>ue</sub> (Nmm) Analítico	W <sub>pl</sub> (mm <sup>3</sup> )	M <sub>upl</sub> (Nmm) Analítico
P1	3,658	5,566	5,682	73365,333	5,194	914497,500	1391408,500	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P2	3,658	5,671	5,682	73365,333	5,194	914497,500	1417781,500	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P3	3,660	4,749	6,096	73365,333	5,197	915078,750	1187321,000	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P4	3,605	4,644	7,208	73365,333	5,119	901366,000	1161068,250	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P5	3,527	4,789	6,695	73365,333	5,007	881646,750	1197317,500	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P6	3,754	5,483	5,418	73365,333	5,330	938420,000	1370634,500	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P7	3,185	4,655	5,309	73365,333	4,522	796164,250	1163718,750	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P8	3,173	4,525	5,918	73365,333	4,505	793168,500	1131305,750	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000
P9	3,561	4,525	6,476	73365,333	5,056	890284,250	1131323,000	3668,267	862042,667	4336,000	1018960,000

En la tabla 5.6 se puede observar la escasa diferencia entre los valores de la flecha analítica y experimental es parecida, siendo siempre la flecha experimental mayor que la obtenida analíticamente. En cuanto a la relación entre los momentos últimos elásticos se aprecia que todos los perfiles tubulares superan el momento último analítico a excepción de los perfiles número 7 y 8. El momento experimental plástico es mayor en todos los casos que el analítico calculado.

## **6 Análisis de los resultados**

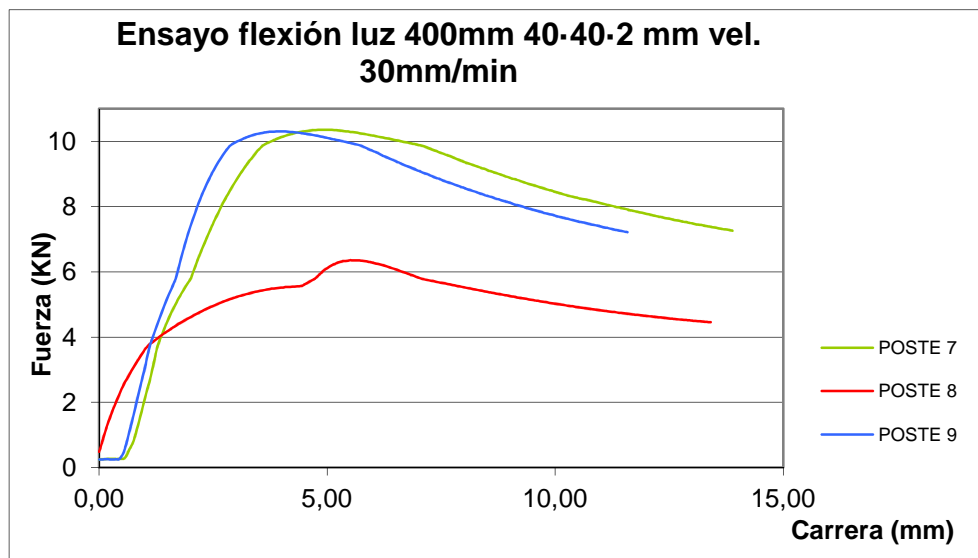
### **6.1 Comportamiento general**

El análisis de los resultados de carga desplazamiento mostrado por los diagramas de las gráficas 5.1 a 5.9 indica que los perfiles tubulares de sección 40·40·2 no poseen un comportamiento elastoplástico como se deduciría a partir de la clasificación de su sección según EC3 o CTE. Para las dos luces y las tres velocidades de carga utilizadas en los ensayos a flexión, la forma de los diagramas carga desplazamiento ha presentado el mismo aspecto: un primer tramo lineal seguido de desplazamientos no lineales hasta alcanzar la carga máxima y a continuación el valor de la carga necesario para seguir aumentando el desplazamiento ha disminuido progresivamente hasta producirse el colapso. Una vez alcanzada la carga máxima, el perfil se ha ido abollando paulatinamente, lo que ha provocado que se necesite cada vez menos carga para mantener la progresión de los desplazamientos en los perfiles. A partir de estos resultados se concluye que para los perfiles estudiados, la clasificación de secciones indicada por EC3 o CTE no es correcta y queda del lado de la inseguridad.

Los resultados obtenidos para ensayos de las mismas características presentan diferencias significativas en todos los casos excepto en los correspondientes a la grafica 5.3. Las diferencias se manifiestan fundamentalmente en los valores de carga máxima alcanzada, sin embargo la pendiente de las gráficas en el tramo correspondiente al comportamiento lineal se mantiene muy similar en los tres perfiles ensayados para cada condición de ensayo. Esto se debe a la irregularidad que presentan los perfiles a lo largo de su espesor. Las diferencias de sección producto de las irregularidades provocan diferencias importantes en los valores de carga última alcanzada, que se plasman en los resultados de los ensayos. La pendiente de los diagramas depende del comportamiento medio del perfil a lo largo de toda su longitud, no de una sección concreta, por lo que las irregularidades no influyen de forma significativa en el comportamiento, al ser el valor medio del espesor de los tubos muy similar en los distintos perfiles.

Observando el resto de los diagramas de carga-desplazamiento estudiados en este trabajo, se comprueba que existen diferencias significativas entre las cargas máximas y cargas en el límite elástico alcanzadas, quedando prueba de ello en dichos diagramas. Como ejemplo de estas diferencias podemos observar el caso del perfil tubular número 8, de sección rectangular 40·40·2 mm ensayado con una luz de 400 mm y una velocidad de 30 mm/min mostrado en la gráfica 5.10, el perfil ensayado no parece desarrollar aparentemente una zona elástica definida, obteniendo una carga de rotura bastante inferior con respecto a la probeta 7 y 9, el salto que se produce en la gráfica probablemente sea motivado por algún tipo de asentamiento, movimiento o impureza en la sección central al aplicarse la carga en el perfil.

Gráfica 6.10 Diagrama carga desplazamiento



Los resultados mostrados por las tablas 5.3 5.4 y 5.5 indican que los valores de la carga elástica y la carga máxima disminuyen a medida que disminuye la velocidad de la carga para las 3 luces ensayadas.

La comparación de los resultados obtenidos analítica y experimentalmente tabla 5.6 para los momentos flectores alcanzados en régimen elástico y plástico permite indicar que el momento flector en régimen elástico obtenido experimentalmente es superior al obtenido analíticamente

cuando la velocidad de carga es 300 o 150 mm/min. Sin embargo para la velocidad de 30 mm/min, el momento obtenido analíticamente es superior al obtenido en los ensayos de flexión.

Si se compara el momento flector calculado a partir de un análisis en régimen plástico con el obtenido a partir de la carga máxima alcanzada en los ensayos, se puede indicar que en todos los casos el resultado obtenido a partir de los datos experimentales es superior al obtenido analíticamente.

## 6.2 Influencia de la velocidad de carga

Con los datos obtenidos se puede asegurar que a menores velocidades de ensayo se obtienen cargas y momentos menores. Entre 300 y 150 mm/min apenas se aprecian diferencias significativas, mientras que si que son más visibles para velocidades de ensayo de 30 mm/min. Si realiza la media de la carga en el límite elástico, carga máxima y momentos últimos de todas las probetas, comparándolas en función de las medias correspondientes a las distintas velocidades se obtienen las tablas 6.1, 6.2 y 6.3. en las que se puede observar como para la velocidad de ensayo de 30 mm/min la carga máxima es un 4,912% menor que la media de todo el ensayo (2,901%).

Tabla 6.1 Porcentajes por velocidades de ensayo

LUZ 1000 mm	Pe (KN)	%	Ppl (KN)	%	Mu Expe. Elastico (Nmm)	%	Mu Expe. Plastico (Nmm)	%
Media total perf.	<b>2,901</b>		<b>3,710</b>		<b>725278,118</b>		<b>927385,743</b>	
Vel 300 mm/min	2,930	1,005	3,831	3,268	732568,188	1,005	957689,250	3,268
Vel150 mm/min	2,985	2,900	3,771	1,645	746309,958	2,900	942638,875	1,645
Vel 30 mm/min	2,788	-3,905	3,527	-4,912	696956,208	-3,905	881829,104	-4,912

Tabla 6.2 Porcentajes por velocidades de ensayo

LUZ 400 mm	Pe (KN)	%	Ppl (KN)	%	Mu Expe. Elastico (Nmm)	%	Mu Expe. Plastico (Nmm)	%
Media total perf.	<b>5,525</b>		<b>6,581</b>		<b>552467,454</b>		<b>658118,775</b>	
Vel 300 mm/min	5,935	7,425	7,065	7,355	593490,642	7,425	706524,167	7,355
Vel150 mm/min	5,727	3,655	6,683	1,546	572660,247	3,655	668294,167	1,546
Vel 30 mm/min	4,913	-11,080	5,995	-8,901	491251,475	-11,080	599537,993	-8,901

**Tabla 6.3 Porcentajes por velocidades de ensayo**

LUZ 200 mm	Pe (KN)	%	Ppl (KN)	%	Mu Expe. Elastico (Nmm)	%	Mu Expe. Plastico (Nmm)	%
Media total perf.	<b>8,038</b>		<b>10,972</b>		<b>401909,569</b>		<b>548578,361</b>	
Vel 300 mm/min	8,852	10,122	11,564	5,397	442590,779	10,122	578185,083	5,397
Vel150 mm/min	7,830	-2,596	11,258	2,613	391476,483	-2,596	562912,500	2,613
Vel 30 mm/min	7,433	-7,526	10,093	-8,010	371661,446	-7,526	504637,500	-8,010

## 6.3 Influencia de la luz entre apoyos

### 6.3.1 Luz de 1000 mm

Para estudiar las diferencias obtenidas con respecto a los momentos últimos se ha procedido a efectuar una tabla comparando en este caso particular, para los ensayos con una luz de 1000 mm, los momentos últimos elásticos y plásticos analíticos con los obtenidos experimentalmente (tabla 6.4). En todas las tablas de este tipo el color rojo en la tabla significa que los valores se encuentran por debajo de los valores analíticos. El signo negativo del porcentaje expresa que los valores se encuentran por encima del valor analítico.

**Tabla 6.4 Análisis de momentos últimos para los ensayos con una luz de 1000 mm**

Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Expe. Elastico (N*mm)	%	Mu Ana. Plástico (N*mm)	Mu Expe. Plástico (N*mm)	%	Fexp. (mm)	flecha analítica elastica (mm)	%
1	862042,667	914497,500	-6,085	1018960,000	1391408,500	-36,552	5,682	5,194	-9,400
2	862042,667	914497,500	-6,085	1018960,000	1417781,500	-39,140	5,682	5,194	-9,400
3	862042,667	915078,750	-6,152	1018960,000	1187321,000	-16,523	6,096	5,197	-17,298
4	862042,667	901366,000	-4,562	1018960,000	1161068,250	-13,946	7,208	5,119	-40,801
5	862042,667	881646,750	-2,274	1018960,000	1197317,500	-17,504	6,695	5,007	-33,708
6	862042,667	938420,000	-8,860	1018960,000	1370634,500	-34,513	5,418	5,330	-1,656
7	862042,667	796164,250	7,642	1018960,000	1163718,750	-14,207	5,309	4,522	-17,404
8	862042,667	793168,500	7,990	1018960,000	1131305,750	-11,026	5,918	4,505	-31,378
9	862042,667	890284,250	-3,276	1018960,000	1131323,000	-11,027	6,476	5,056	-28,089
10	645806,857	881244,250	-36,456	768685,000	1183210,000	-53,927	8,920	7,635	-16,826
11	645806,857	920231,500	-42,493	768685,000	1163164,000	-51,319	10,141	7,973	-27,195
12	645806,857	899880,500	-39,342	768685,000	1167055,750	-51,825	10,146	7,797	-30,134
13	645806,857	837215,750	-29,639	768685,000	1168231,750	-51,978	9,256	7,254	-27,605
14	645806,857	885052,000	-37,046	768685,000	1180450,250	-53,567	9,003	7,668	-17,408

15	645806,857	938703,750	-45,354	768685,000	1180986,500	-53,637	9,768	8,133	-20,110
16	645806,857	941334,000	-45,761	768685,000	1171754,250	-52,436	9,981	8,156	-22,386
17	645806,857	895742,250	-38,701	768685,000	1144955,000	-48,950	9,215	7,761	-18,744
18	645806,857	899334,000	-39,257	768685,000	1146589,750	-49,162	8,353	7,792	-7,201
19	507785,045	617747,250	-21,655	862042,667	740950,500	14,047	6,555	5,956	-10,054
20	507785,045	671032,750	-32,149	862042,667	845104,000	1,965	6,559	6,470	-1,374
21	507785,045	618557,750	-21,815	862042,667	758127,750	12,054	6,547	5,964	-9,771
22	507785,045	618857,750	-21,874	862042,667	790963,750	8,245	6,701	5,967	-12,298
23	507785,045	921967,750	-81,567	862042,667	989547,500	-14,791	10,023	8,889	-12,752
24	507785,045	568343,000	-11,926	862042,667	628484,500	27,094	7,467	5,480	-36,260
25	507785,045	698746,500	-37,607	862042,667	830676,750	3,639	7,492	6,737	-11,204
26	507785,045	706660,750	-39,165	862042,667	801073,500	7,073	8,499	6,813	-24,748
27	507785,045	569150,750	-12,085	862042,667	620386,000	28,033	7,543	5,487	-37,455
28	203616,045	437533,250	-114,882	345669,333	494227,750	-42,977	10,400	10,520	1,140
29	203616,045	490108,750	-140,702	345669,333	575885,500	-66,600	11,246	11,784	4,571
30	203616,045	510408,500	-150,672	345669,333	568034,750	-64,329	13,319	12,272	-8,527
31	203616,045	527832,250	-159,229	345669,333	585687,250	-69,436	13,860	12,691	-9,210
32	203616,045	524963,750	-157,820	345669,333	596411,500	-72,538	13,095	12,622	-3,743
33	203616,045	411350,750	-102,023	345669,333	461883,250	-33,620	9,764	9,891	1,279
34	203616,045	442236,000	-117,191	345669,333	522716,500	-51,219	10,434	10,633	1,872
35	203616,045	409879,000	-101,300	345669,333	495176,750	-43,252	9,571	9,855	2,882
36	203616,045	320774,250	-57,539	345669,333	422273,250	-22,161	7,340	7,713	4,829
Media			-48,803	Media		-28,889	Media		-14,932

En esta tabla (6.4) se obtiene que para los momentos últimos elásticos, los resultados experimentales son mayores que los calculados analíticamente en todos los casos a excepción de las probetas 7 y 8 que son menores (a poca distancia de igualar los valores analíticos) y pertenecen a la sección 40·40·2 mm y ambas a una velocidad de 30mm/min. Los perfiles que presentan menos diferencia en porcentaje son las probetas del 1 al 9 pertenecientes a la sección 40·40·2 con un porcentaje de entre 3,276% a 8,6%.

Como resultado se obtiene que el momento último elástico experimental alcance en media un 48,803% por encima del valor analítico medio.

Para el caso del momento último plástico todas las probetas superan el valor analítico a excepción de las probetas 19 a 22 y 24 a 27, perteneciendo todas ellas a las probetas circulares Ø40·2mm, llegando a presentar diferencias en porcentaje desde el 1,985% al 28,033%, en este caso no hay evidencia de



la influencia de las diferentes velocidades de ensayo. En media el momento plástico experimental es de un 28,889% por encima del valor analítico medio.

Como resultados acerca del comportamiento de las flechas se obtiene que todas las flechas experimentales superan los valores de las flechas analíticas calculadas, a excepción de las probetas 28 y 29 pertenecientes a la sección Ø30•2mm con una velocidad de ensayo de 300 mm/min y las probetas 33 (Ø30•2mm 150 mm/min) 34 a 36(Ø30•2mm velocidad 30mm/min). Estas probetas su flecha experimental fue desde un 1,140% a un 4,829% menor que la flecha analítica. En media la flecha experimental se sitúa en un 14,93% por encima de la flecha analítica. Las demás tablas para las demás secciones se encuentran en el anexo 7.

### **6.3.2 Luz de 400 mm**

Las tablas revelan que un total de 20 de las 36 probetas superan el momento último analítico, mientras que 16 no lo hacen. La variación media del momento último elástico experimental se encuentra por debajo del valor analítico medio en un 6,284%.

En el caso del momento último plástico las tablas muestran que 18 de las probetas no superan el valor del momento último plástico correspondiente. Como resultado se obtiene que el momento último plástico experimental para una luz de 400 mm alcance en media un 16,016% por debajo del valor analítico medio.

Respecto a las consideraciones de flecha, todos los valores obtenidos para una luz de 400 mm son muy superiores a los calculados analíticamente, suceso que ocurre también, aún más acentuado para la luz de 200 mm. En todos los ensayos realizados, la ecuación de la flecha elástica obtenida de manera analítica solo se ajusta para las luces de ensayo mayores, en este caso de 1000 mm.

### **6.3.3 Luz de 200 mm**

El momento último elástico analítico solo lo superan 6 de las 36 probetas (las 6 que lo superan pertenecen a la sección 35·35·2mm). El porcentaje medio del momento último experimental es de 29,710% por debajo del momento elástico último analítico.

El momento último plástico analítico solo lo superan 5 de las probetas (Perfil 11 a 15). El porcentaje medio del momento último experimental es de 28,67% por debajo del momento elástico último analítico.

Como conclusión se aprecia que a menor luz de ensayo, más difícil es que el momento experimental supere a los valores de los momentos analíticos calculados.

## **6.4 Influencia del envejecimiento**

Los resultados de flecha revelan que todos los perfiles superan los valores analíticos, para luces de 400 mm y 200 mm la diferencia entre ambos aumenta significativamente, solo acercándose los resultados analíticos con los experimentales para luces de 1000 mm (sucede de modo similar en los perfiles adquiridos). Como conclusión se puede señalar que tener más flecha experimental que la calculada analíticamente no va del lado de la seguridad.

Estudiando las tablas obtenidas, para los perfiles conservados a la intemperie, ninguno de los perfiles supera los valores analíticos para luces de 400 mm y 200mm, esto puede ser debido al desgaste y a su posible corrosión por el paso del tiempo de los perfiles conservados a la intemperie.

Para una luz de 1000 mm solo superan el momento último analítico elástico 4 de los 12 perfiles estudiados. En el caso del momento último plástico analítico solo lo supera 1 perfil de los 12 estudiados. En los demás casos para luces de 400 y 200 mm ninguno de los momentos experimentales perfiles supera los momentos últimos analíticos.

En vista de los datos, se puede concluir que en media los momentos últimos experimentales de los perfiles expuestos a la intemperie son menores que los de los perfiles nuevos.

Para comparar la diferencia entre los momentos últimos se procede a la comparación de los perfiles expuestos a la intemperie, con los perfiles nuevos de sección Ø40.2 mm, ya que son de las mismas medidas. Como principales resultados se muestra la tabla 6.5, en la que se expresan los porcentajes de los momentos últimos experimentales elástico y plástico (signo negativo significa que está por encima de los valores analíticos). Podemos apreciar que mientras que para una luz de 400 mm en el caso de los perfiles nuevos, el momento último elástico experimental es en media un 6,284% por debajo del valor analítico, para los perfiles a la intemperie dicho momento se encuentra 59,061% por debajo de su valor analítico.

Por lo tanto podemos concluir que los momentos últimos en perfiles expuestos a la intemperie son inferiores que en el caso de los perfiles nuevos.

**Tabla 6.5 Porcentajes de diferencia de los momentos últimos experimentales respecto de los valores analíticos para perfiles nuevos y perfiles expuestos a la intemperie.**

%	PERFILES NUEVOS		PERFILES A LA INTEMPERIE	
	Mu elástico exp.	Mu plástico exp	Mu elástico exp.	Mu plástico exp
1000 mm	-48,803	-28,889	-11,649	14,124
400 mm	6,284	16,016	59,061	67,548
200 mm	29,711	28,676	69,314	71,006

También se ha realizado un estudio para evaluar en que porcentaje difiere la carga de rotura y la carga en el límite elástico de los perfiles nuevos con los perfiles que se encuentran a la intemperie, obteniendo los datos que se reflejan en la tabla inferior (6.6 y 6.7)

**Tabla 6.6 Porcentajes de diferencia entre Perfiles a la intemperie y perfiles nuevos con respecto a su carga máxima**

Ø40·2	<b>CARGA MÁXIMA KN</b>		% menos Perfiles a la Intemperie
	Media Perfiles Nuevos KN	Media Perfiles a la Intemperie KN	
Luz 1000	3,11	2,96	4,89
Luz 400	3,11	2,80	9,91
Luz 200	7,13	5,00	29,91
Media			14,90

**Tabla 6.7 Porcentajes de diferencia entre Perfiles a la intemperie y perfiles nuevos con respecto a su carga en el límite elástico**

Ø40·2	<b>CARGA LÍMITE ELÁSTICO KN</b>		% menos Perfiles a la Intemperie
	Media Perfiles Nuevos KN	Media Perfiles a la Intemperie KN	
Luz 1000	2,66	2,20	17,37
Luz 400	2,21	2,08	6,13
Luz 200	4,12	3,12	24,44
Media			15,98

En las tablas 6.3 y 6.4 se obtiene que para el caso de la carga máxima para una luz de 1000 mm los perfiles a la intemperie alcancen en media un 4,89% menos de carga que los perfiles nuevos. Se obtiene que en media los perfiles expuestos a la intemperie alcanzan un 14,90% menos para la carga máxima y un 15,98% para la carga en el límite elástico que los perfiles nuevos.



## CONCLUSIONES

- Para los perfiles estudiados, la clasificación de secciones indicada por EC3 o CTE queda del lado de la inseguridad.
- Las irregularidades en el espesor de los perfiles producen diferencias en los mismos ensayos cuando se evalúa la carga máxima, la rigidez a flexión del perfil se mantiene constante entre distintos tubos.
- La carga elástica y la carga máxima disminuyen cuando la velocidad de carga es menor.
- Para todas las velocidades de carga, para la luz de 1000 mm existe una mayor probabilidad de que los momentos experimentales elásticos y plásticos superen sus respectivos momentos analíticos, comparada con las luces de 400mm y 200 mm, ya que a medida de que la luz del ensayo sea menor se aumenta el porcentaje de momentos experimentales que no superan los valores analíticos.
- En vista de los datos, se puede concluir que, en valores medios los momentos últimos experimentales y las cargas de los perfiles expuestos a la intemperie son menores que los de los perfiles nuevos, probablemente debido a la posible corrosión.
- Respecto a flecha, todos los valores obtenidos para una luz de 400 mm y 200 mm son muy superiores a los calculados analíticamente. En todos los ensayos realizados, la ecuación de la flecha elástica obtenida de manera analítica solo se ajusta para las luces de ensayo mayores, en este caso de 1000 mm. En todos los casos la flecha experimental es superior a la analítica.

## **POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

- Aumentar el número de ensayos para evaluar con mayor certeza el comportamiento de los perfiles tubulares, por ejemplo comparando con otras casas comerciales que suministren perfiles tubulares de acero.
- Realización de ensayos de tracción que permitan obtener el módulo de elasticidad de los perfiles.
- Variar las velocidades de los ensayos a flexión, y variar el modo de ensayo de 3 a 4 puntos para obtener su posible influencia.
- Realización de métodos de evaluación por carga de impacto, ya que este ensayo se aproxima mejor al modo de utilización de los perfiles como protecciones colectivas y medios auxiliares.
- Profundizar en el proceso de fabricación de los perfiles tubulares para conocer exhaustivamente el por qué de las diferencias de espesor.
- Empleo de galgas extensiométricas en perfiles tubulares de acero para medir deformaciones con mayor exactitud.
- Empleo de técnicas de propagación de ultrasonidos para evaluar la pérdida de sección de los perfiles tubulares de acero afectados de corrosión.

## 7 Bibliografía

1. **González García, María de las Nieves.** *Tesis Doctoral. Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de borde.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid., 2011.
2. **Wardenier, J.(1).** Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales. s.l. : Instituto para la construcción tubular (ICT), 2002, 1 Introducción, pág. 16.
3. Empresa Cintac Información Técnica de Perfiles tubulares de acero. [En línea] [Citado el: 29 de Mayo de 2011.]  
[http://www.registrocdt.cl/fichas%20especificas/listado\\_fichas/fichas/c11/CINTAC\\_perfiles\\_acero\\_estructural\\_industrial/index.htm](http://www.registrocdt.cl/fichas%20especificas/listado_fichas/fichas/c11/CINTAC_perfiles_acero_estructural_industrial/index.htm).
4. *El Bambú usado como material de construcción.* **Belinda Falck, Nelly.** X X I I Congreso de Centroamérica y Panamá de Ingeniería Sanitaria y ambiental: el reto.
5. **Rojas, Gustavo.** Estructuras de acero. *Escuela de Ingeniería en Construcción / Instituto Tecnológico de Costa Rica.* [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.]  
<http://estructurasacero.blogspot.com/2007/06/columnas-mixtas-ventajas-y.html>.
6. **J. Wardenier, Y. Kurobane, J.A. Packer, G.J. van der Vegte y X.- L. Zhao.** *Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares circulares (CHS) bajo cargas predominantemente estáticas.* [ed.] © por CIDECT. 2ª. s.l. : Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire, 2008. ISBN 978-3-938817-05-6.
7. **Wardenier, J.(2).** Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales” Instituto para la Construcción Tubular (I.C.T). 2002, Historia y desarrollo, pág. 16.
8. **Cidect, Altos hornos de Vizcaya.** *Construir con Perfiles tubulares de Acero.* Vizcaya : CIDECT, 1988. 2-85259-106-5.
9. **Gómez Sanz, Juan José.** Construcción de máquinas de Vapor. [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://vaporfacil.galeon.com/index.htm>.
10. William Murdoch, first man to use gaslight. [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://www.cornwall-calling.co.uk/famous-cornish-people/murdoch.htm>.
11. **Parker, Bev.** A History of Wednesbury. *Cornelius Whitehouse.* [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.]  
<http://www.localhistory.scit.wlv.ac.uk/articles/Wednesbury/Whitehouse.htm>.
12. **Wengenroth, Ulrich.** *Enterprise and technology: the German and British steel industries 1865-1895.* s.l. : Cambridge University Press, 1994.



13. **Brensing, Dr. Ing. Karl-Heinz, Dipl. Ing. Baldur Sommer.** Steel tube and manufacturing processes. Düsseldorf : s.n. pags. 9-36.
14. **Macaulay, David.** Building Big. [En línea] 2000. [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] [http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/firth\\_of\\_forth.html](http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/firth_of_forth.html).
15. **Wardenier, J.(4).** Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales. s.l. : Instituto para la construcción tubular ICT, 2002, 1.3 fabricación de perfiles, págs. 17-21.
16. *Perfil tubular de acero conformado en frío o en caliente. ¿Hay alguna diferencia?*  
**Alonso Zarain, Angel Iglesias Toquero, Gorka.** Álava : ITC, 2008, Construber, Vol. 9.
17. **González de Vargas, Yenny.** Procesos de Conformado. [En línea] 16 de Junio de 2009. [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://procesosmanufacturau.blogspot.com/>.
18. **Rodríguez, Raymel.** *Acero conformado en frío, apuntes sobre diseño.* Ingeniero. Ciudad de La Habana Cuba : s.n., Marzo 2008.
19. *Características del conformado en caliente de un acero de alta resistencia.* **A. Al Omar, E. Peña, (1) J. M. Prado.** Barcelona : Universidad Politécnica de Cataluña. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/11989-Caracteristicas-del-conformado-en-caliente-de-un-acero-de-alta-resistencia.html>.
20. **Training, Corus BCSA, [prod.].** *Steelmaking: Rolling.* [http://www.youtube.com/watch?v=6xnKmt\\_gsLs&feature=player\\_embedded#at=36](http://www.youtube.com/watch?v=6xnKmt_gsLs&feature=player_embedded#at=36).
21. **Wardenier, J.(3).** Perfiles tubulares en aplicaciones Estructurales. s.l. : Instituto para la Construcción Tubular (I.C.T.), 2002, 1.2 Simbología, pág. 17.
22. **ISO 657-14:2000** *Secciones calientes hechas de acero - Parte 14: Secciones calientes terminadas estructurales - Dimensiones y propiedades de grupo(en sección).*
23. **ISO 4019:2001** *Aceros estructurales - secciones Formadas por frío, soldadas, estructurales huecos - Dimensiones y propiedades de grupo(en sección).* 2008.
24. **UNE-EN 10210-2: 2007.** *Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 2: Tolerancias, dimensiones y propiedades de sección .* Madrid : Asociación Española de Normalización (AENOR), 2007.
25. **UNE-EN 10219-2: 2007.** *Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 2: Tolerancias, dimensiones y propiedades de sección. .* Madrid : Asociación Española de Normalización (AENOR), 2007.

26. **UNE-EN 10219-1: 2007.** *Perfiles huecos para construcción conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro*. Madrid : Asociación Española de Normalización (AENOR), 2007.

27. **UNE-EN 10210-1: 2007.** *Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro..* Madrid : Asociación Española de Normalización (AENOR), 2007.

28. Instituto para la construcción tubular ICT. [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://www.ictubular.es/>.

29. **ITEC**, *Instituto Técnico de la estructura en Acero*. s.l. : Instituto Técnico de la estructura en Acero ITEC. pág. 9.

30. **Wardenier, J.(5).** *Perfiles tubulares en aplicaciones estructurales*. s.l. : Instituto para la construcción tubular ICT, 2002, 2 Propiedades de los perfiles tubulares, propiedades mecánicas, págs. 21-25.

31. **ENV 1993-1-1 Eurocódigo 3** . *Proyectos de Estructuras de Acero*. 1993.

32. **Trujillo Delgado, Antonio.** *Introducción al CTE-DB-SE-A (Código Técnico de la Edificación - Documento Básico-Seguridad Estructural – Acero)*. Sevilla : E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Sevilla. Dr. Arquitecto. Profesor Titular, Departamento de mecánica de medios continuos, teoría de estructuras e ingeniería de del terreno..

33. **Código Técnico de la Edificación Documento Básico Seguridad Estructural Acero CTE DB-SE-A** . s.l. : Ministerio de Fomento., 2007 b.

34. **UNE-EN 13374** *Sistemas provisionales de protección de borde. Especificaciones de producto, métodos de ensayo*. s.l. : AENOR, 2004.

35. *Barandillas ¿sistemas provisionales de protección de borde?* **Goldaracena González, José**. 388, Agosto- Octubre de 2009, Cimbra. Ingeniero Técnico de Obras Públicas y Técnico superior de prevención de riesgos laborales.

36. **Rodríguez González, Luis.** *Barandilla de seguridad para la construcción*. E04G21/32 Asturias, España, 21 de 06 de 2002.

37. Grupo de asesores de epis.FFM.SL. [En línea] [Citado el: 25 de Mayo de 2011.] <http://www.grupoasesoresepis.es/productos.aspx?titulo=Protecciones-Provisionales-de-Borde-EN-13374&var2=11&var=43>.

38. **UNE 85239:1991 Barandillas.** *Cálculo de secciones de los elementos. Características de lso anclajes, condiciones de suministro e instalación en obra*. s.l. : AENOR, 1991.

39. **UNE 85240:1990** Barandillas. Clasificación. 1990.
40. **UNE 8237:1991** Barandillas, definiciones, terminología, condiciones generales de seguridad. s.l. : AENOR, 1991.
41. **UNE 85238:1991** Barandillas métodos de ensayo. s.l. : AENOR, 1991.
42. **Combisafe**. [En línea] Empresa de Seguridad. Catálogo de sistemas de protección de borde. [Citado el: 29 de Mayo de 2011.] <http://www.combisafe.es/products.html>.
43. **UNE180401:2010**. Plataformas de carga y descarga para obras de construcción. Especificaciones de producto y método de ensayo. 2010.
44. **UNE-EN74-1:2008**. Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 1:Acoplamientos para tubos.Requisitos y procedimientos de ensayo. 2008.
45. **UNE-EN74-2:2010**. Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 2:Acoplamientos especiales.Requisitos y procedimientos de ensayo. 2010.
46. **UNE-EN74-3:2008**. Acoplamientos, espigas ajustables y placas base para andamios y cimbras. Parte 3: Placa base ordinarias y espigas ajustables. Requisitos y procedimientos de ensayo. 2008.
47. **UNE-EN12810-1:2005**. Andamios de fachada de componentes prefabricados.Parte1:Especificaciones de los productos. 2005.
48. **UNE-EN12810-2:2005**. Andamios de fachada de componentes prefabricados. Parte 2: Métodos particulares de diseño estructural. 2005.
49. **UNE-EN12811-1:2005**. Equipamiento para trabajos temporales en obra. Parte 1: Andamios. Requisitos de comportamiento y diseño general. 2005.
50. **UNE-EN12811-2:2005**. Equipamiento para trabajos temporales de obra. Parte 2: Información sobre los materiales. 2005.
51. **UNE-EN12811-3:2005**. Equipamiento para trabajos temporales de obra. Parte 3: Ensayos de carga. 2005.
52. **UNE-76501:1987**. Estructuras auxiliares y desmontables. Clasificación y definición. 1987.
53. **UNE-EN39:2001**. Tubos de Acero libres para andamiajes y acoplamientos. Condiciones técnicas de suministro. 2001.
54. **Torres, Freddy**. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Industrial, Optimización del proceso de permisología para los trabajos en espacios confinados, grúas y andamios en las casas

de máquinas I,II y III, en la Central Hidroeléctrica Antonio José de Sucre. Guayana : Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José Sucre, 2009. pág. 62.

55. **González García, María de las Nieves.** Análisis de elementos de acero. *Tesis Doctoral. Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de borde.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2010, págs. 85-115.

56. **González García, María de las Nieves.** Discusión. Análisis de los resultados obtenidos. *Tesis Doctoral. Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de borde.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2011, págs. 104-118.

57. **González García, María de las Nieves.** Conclusiones. *Tesis Doctoral. Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de borde.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2011, págs. 213-218.

58. **Saladrigas Real, Esther.** *Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable.* Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2001. 8469955225.

59. **Saládrigas Real, Esther (2).** *Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable.* s.l. : Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2001. Conclusiones.

60. **SafeNet** Empresa suministradora de sistemas de Seguridad. [En línea] <http://www.safenet-inc.com/>.

61. **Ibertest Internacional.** Máquinas para ensayos universales. [En línea] [Citado el: 10 de mayo de 2011.] <http://www.ibttestint.com/index.php?lang=es>.

62. **UNE-EN 10025-3: 2006.** *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 3: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino en la condición de normalizado/laminado de normalización.* Madrid : Asociación Española de Normalización AENOR, 2006.

63. **Ternium, Empresa.** Catálogo de productos de tubos y perfiles . [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://www.ternium.com/sp/default.asp>.

64. **Cintac, Empresa.** Catálogo de productos de tubos y perfiles. [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2011.] <http://www.cintac.cl/novedades/bienvenido-al-area-de-catalogos-y-manuales-tecnicos-de-los-productos-cintac/>.

65. **Código Técnico de la Edificación (2007b)** Documento Básico SE-AE, Seguridad Estructural. *Acciones en la Edificación.* Madrid : Ministerio de Fomento. , 2007.

66. *Instrucción de acero estructural (EAE)* . Madrid : Ministerio de Fomento.  
Secretaría General Técnica. Comisión Interministerial Permanente de Estructuras de  
Acero., 2010.

## 8 Anexos

### 8.1 Anexo 1: Estudio de las soldaduras

Se realizó un estudio de la colocación de las soldaduras después del ensayo de flexión en cada uno de los perfiles ensayados, ya que es posible su fácil observación como se puede apreciar en la figura 8.2. Como criterio de signos se ha adoptado que la posición ensayada de los perfiles (cara en la que se aplicó la carga) es la indicada en la figura 8.1. El posterior estudio y obtención de fotografías se ha realizado tomando en cuenta estas indicaciones. En los esquemas la posición de la soldadura se he representado con una línea color rojo, y en las fotografías se refleja con una línea azul (figura 8.3)



Figura 8.1 Criterio de signos de colocación de cara para fotografías.

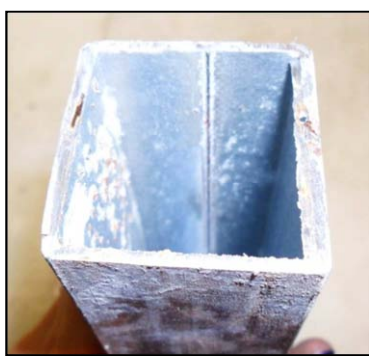


Figura 8.2 Apreciación visual de la soldadura

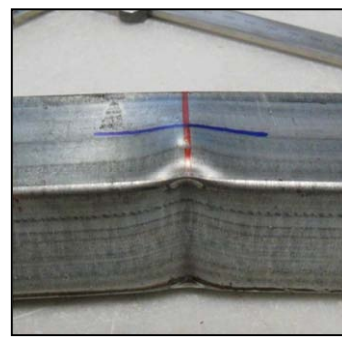
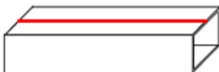



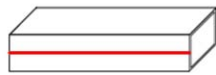


Figura 8.3 Línea azul que marca la posición de la soldadura

Tabla 8.1 Posición de la soldadura en los perfiles tubulares de acero

Nº	PERFIL	POSICIÓN DE LA SOLDADURA	FOTOGRAFÍAS DE LAS SOLDADURAS
1			
2			

3



4



5



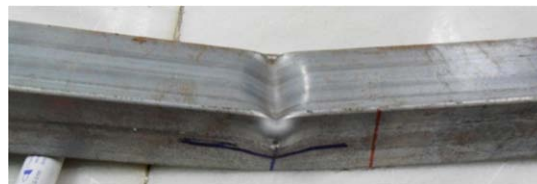
6



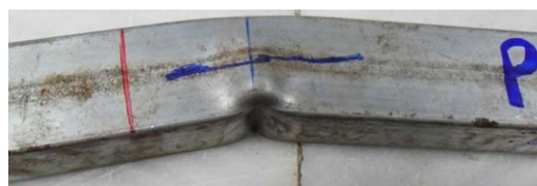
7



8



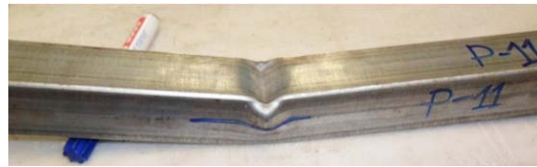
9



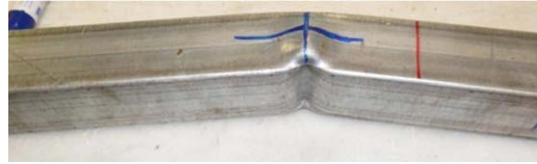
10



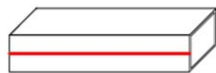
11



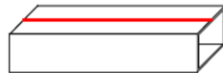
12



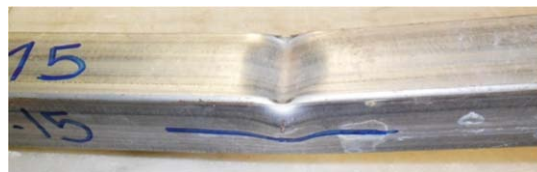
13



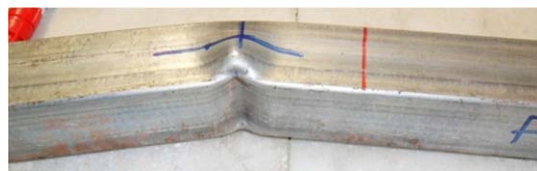
14



15



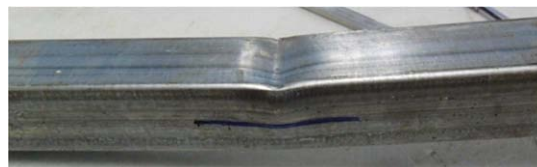
16



17



18



19

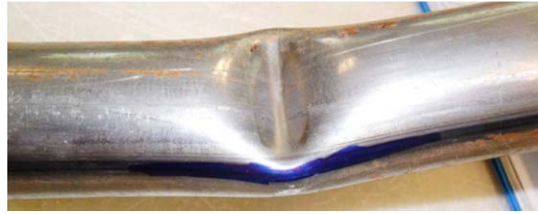




20



21



22



23



24



25



26



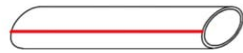
27



28



29



30



31



32



33



34



35

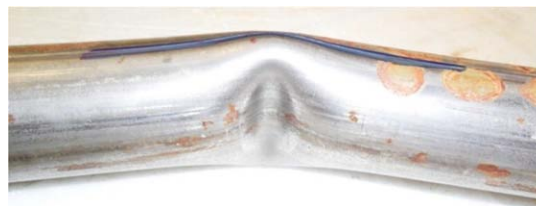




Tabla 8.2 Fotografías de los perfiles después de los ensayos

VISTA GENERAL DE LAS PROBETAS ENSAYADAS	
Sección 40X40X2	
Sección 35X35X2	
Sección 40X2	

Sección  
30X2





## 8.2 Anexo 2: Clasificación de las secciones

Tabla 8.3 Clase resistente de probetas luz 1000 mm

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 1000mm														
CLASE	Nº	W (mm³)	C. Lim. elástico (KN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLím. elástico (N/mm²)	$\varepsilon$	$\varepsilon_{X72}$	$\varepsilon_{X83}$	$\varepsilon_{X124}$	$\varepsilon_{X50}$	$\varepsilon_{X70}$	$\varepsilon_{X90}$	d/t o c/t	Tipo de Sección
CUADRADO 40x40x2	1	2168,000	3,658	914497,500	421,816	0,746	53,741	61,951	92,554				20,000	CLASE 1
	2	2168,000	3,658	914497,500	421,816	0,746	53,741	61,951	92,554				20,000	CLASE 1
	3	2168,000	3,660	915078,750	422,084	0,746	53,724	61,932	92,524				20,000	CLASE 1
	4	2168,000	3,605	901366,000	415,759	0,752	54,131	62,401	93,225				20,000	CLASE 1
	5	2168,000	3,527	881646,750	406,664	0,760	54,733	63,095	94,262				20,000	CLASE 1
	6	2168,000	3,754	938420,000	432,851	0,737	53,051	61,157	91,366				20,000	CLASE 1
	7	2168,000	3,185	796164,250	367,234	0,800	57,596	66,396	99,194				20,000	CLASE 1
	8	2168,000	3,173	793168,500	365,853	0,801	57,705	66,521	99,381				20,000	CLASE 1
	9	2168,000	3,561	890284,250	410,648	0,756	54,467	62,788	93,804				20,000	CLASE 1
CUADRADO 35X35X2	10	1618,773	3,525	881244,250	544,390	0,657	47,305	54,533	81,471				17,500	CLASE 1
	11	1618,773	3,681	920231,500	568,475	0,643	46,293	53,365	79,726				17,500	CLASE 1
	12	1618,773	3,600	899880,500	555,903	0,650	46,813	53,965	80,622				17,500	CLASE 1
	13	1618,773	3,349	837215,750	517,192	0,674	48,533	55,948	83,585				17,500	CLASE 1
	14	1618,773	3,540	885052,000	546,743	0,656	47,204	54,415	81,295				17,500	CLASE 1
	15	1618,773	3,755	938703,750	579,886	0,637	45,835	52,837	78,938				17,500	CLASE 1
	16	1618,773	3,765	941334,000	581,511	0,636	45,771	52,763	78,827				17,500	CLASE 1
	17	1618,773	3,583	895742,250	553,346	0,652	46,921	54,090	80,809				17,500	CLASE 1
	18	1618,773	3,597	899334,000	555,565	0,650	46,827	53,981	80,647				17,500	CLASE 1
CIRCULAR 40x2	19	2160,787	2,471	617747,250	285,890	0,907				45,332	63,465	81,598	20,000	CLASE 1
	20	2160,787	2,684	671032,750	310,550	0,870				43,495	60,893	78,291	20,000	CLASE 1
	21	2160,787	2,474	618557,750	286,265	0,906				45,302	63,423	81,544	20,000	CLASE 1
	22	2160,787	2,475	618857,750	286,404	0,906				45,291	63,408	81,524	20,000	CLASE 1
	23	2160,787	3,688	921967,750	426,681	0,742				37,107	51,949	66,792	20,000	CLASE 1
	24	2160,787	2,273	568343,000	263,026	0,945				47,261	66,166	85,070	20,000	CLASE 1
	25	2160,787	2,795	698746,500	323,376	0,852				42,624	59,673	76,722	20,000	CLASE 1
	26	2160,787	2,827	706660,750	327,039	0,848				42,384	59,338	76,292	20,000	CLASE 1
	27	2160,787	2,277	569150,750	263,400	0,945				47,228	66,119	85,010	20,000	CLASE 1
CIRCULAR 30X2	28	1635,500	1,750	437533,250	267,523	0,937				46,862	65,607	84,352	20,000	CLASE 1
	29	1635,500	1,960	490108,750	299,669	0,886				44,277	61,988	79,699	15,000	CLASE 1
	30	1635,500	2,042	510408,500	312,081	0,868				43,388	60,743	78,099	15,000	CLASE 1
	31	1635,500	2,111	527832,250	322,734	0,853				42,666	59,732	76,799	15,000	CLASE 1
	32	1635,500	2,100	524963,750	320,981	0,856				42,782	59,895	77,008	15,000	CLASE 1
	33	1635,500	1,645	411350,750	251,514	0,967				48,331	67,663	86,995	15,000	CLASE 1
	34	1635,500	1,769	442236,000	270,398	0,932				46,612	65,257	83,902	15,000	CLASE 1
	35	1635,500	1,640	409879,000	250,614	0,968				48,417	67,784	87,151	15,000	CLASE 1
	36	1635,500	1,283	320774,250	196,132	1,095				54,731	76,623	98,515	15,000	CLASE 1

Tabla 8.4 Clase resistente de probetas luz 400 mm

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 400 mm																	
CLAS E	Nº	W (mm^3)	C. Lim. elástico (kN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLim. elástico (N/mm2)	ε	εX72	εX83	εX124	εX50	εX70	εX90	d/t o c/t	Tipo de Sección			
CUADRADO 40x40x2	1	2168,000	10,68744	1068744,000	492,963	0,690	49,712	57,307	85,615				20,000	CLASE 1			
	2	2168,000	9,707892	970789,200	447,781	0,724	52,160	60,128	89,830				20,000	CLASE 1			
	3	2168,000	10,44537	1044537,000	481,798	0,698	50,285	57,967	86,601				20,000	CLASE 1			
	4	2168,000	9,032053	903205,300	416,608	0,751	54,076	62,337	93,131				20,000	CLASE 1			
	5	2168,000	9,763283	976328,300	450,336	0,722	52,011	59,958	89,575				20,000	CLASE 1			
	6	2168,000	9,72914	972914,000	448,761	0,724	52,103	60,063	89,732				20,000	CLASE 1			
	7	2168,000	8,37385	837385,000	386,248	0,780	56,161	64,741	96,721				20,000	CLASE 1			
	8	2168,000	3,546818	354681,800	163,599	1,199	86,293	99,477	148,616				20,000	CLASE 1			
	9	2168,000	8,991195	899119,500	414,723	0,753	54,199	62,479	93,342				20,000	CLASE 1			
CUADRADO 35x35x2	10	1618,773	8,277948	827794,800	511,372	0,678	48,809	56,266	84,060							17,500	CLASE 1
	11	1618,773	9,008515	900851,500	556,503	0,650	46,788	53,936	80,579							17,500	CLASE 1
	12	1618,773	9,633731	963373,100	595,126	0,628	45,244	52,156	77,920							17,500	CLASE 1
	13	1618,773	9,483737	948373,700	585,860	0,633	45,601	52,567	78,534							17,500	CLASE 1
	14	1618,773	9,80502	980502,000	605,707	0,623	44,847	51,699	77,237							17,500	CLASE 1
	15	1618,773	9,69494	969494,000	598,907	0,626	45,101	51,992	77,674							17,500	CLASE 1
	16	1618,773	9,659343	965934,300	596,708	0,628	45,184	52,087	77,817							17,500	CLASE 1
	17	1618,773	9,459863	945986,300	584,385	0,634	45,658	52,634	78,633							17,500	CLASE 1
	18	1618,773	8,133496	813349,600	502,448	0,684	49,240	56,763	84,803							17,500	CLASE 1
CIRCULAR 40x2	19	2160,787	2,500425	250042,500	115,718	1,425				71,253	99,754	128,255	20,000	CLASE 1			
	20	2160,787	2,601326	260132,600	120,388	1,397				69,857	97,800	125,743	20,000	CLASE 1			
	21	2160,787	2,942551	294255,100	136,180	1,314				65,682	91,955	118,228	20,000	CLASE 1			
	22	2160,787	2,178747	217874,700	100,831	1,527				76,332	106,865	137,398	20,000	CLASE 1			
	23	2160,787	2,280432	228043,200	105,537	1,492				74,611	104,455	134,299	20,000	CLASE 1			
	24	2160,787	2,249389	224938,900	104,100	1,502				75,124	105,173	135,223	20,000	CLASE 1			
	25	2160,787	2,03715	203715,000	94,278	1,579				78,940	110,516	142,092	20,000	CLASE 1			
	26	2160,787	1,802565	180256,500	83,422	1,678				83,920	117,488	151,056	20,000	CLASE 1			
	27	2160,787	1,339082	133908,200	61,972	1,947				97,366	136,312	175,258	20,000	CLASE 1			
CIRCULAR 30x2	28	1635,500	1,064236	106423,600	65,071	1,900				95,019	133,027	171,034	20,000	CLASE 1			
	29	1635,500	1,988932	198893,200	121,610	1,390				69,506	97,308	125,110	15,000	CLASE 1			
	30	1635,500	2,360511	236051,100	144,330	1,276				63,801	89,321	114,841	15,000	CLASE 1			
	31	1635,500	2,096389	209638,900	128,180	1,354				67,701	94,781	121,861	15,000	CLASE 1			
	32	1635,500	0,9828686	98286,860	60,096	1,977				98,874	138,423	177,973	15,000	CLASE 1			
	33	1635,500	1,423231	142323,100	87,021	1,643				82,166	115,032	147,899	15,000	CLASE 1			
	34	1635,500	2,314804	231480,400	141,535	1,289				64,428	90,199	115,970	15,000	CLASE 1			
	35	1635,500	0,677125	67712,500	41,402	2,382				119,123	166,772	214,421	15,000	CLASE 1			
	36	1635,500	2,614886	261488,600	159,883	1,212				60,618	84,865	109,113	15,000	CLASE 1			

Tabla 8.5 Clase resistente de probetas luz 200 mm

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 200 mm														
CLASE	Nº	W (mm <sup>3</sup> )	C. Lim. elástico (KN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLím. elástico (N/mm <sup>2</sup> )	ε	εX72	εX83	εX124	εX50	εX70	εX90	d/t o c/t	Tipo de Sección
CUADRADO 40x40x2	1	2168,000	13,06	653220,000	301,301	0,883	63,587	73,301	109,510				20,000	CLASE 1
	2	2168,000	12,83	641493,000	295,892	0,891	64,165	73,968	110,507				20,000	CLASE 1
	3	2168,000	13,75	687449,500	317,089	0,861	61,983	71,453	106,749				20,000	CLASE 1
	4	2168,000	10,75437	537718,500	248,025	0,973	70,084	80,791	120,700				20,000	CLASE 1
	5	2168,000	10,09602	504801,000	232,842	1,005	72,333	83,384	124,573				20,000	CLASE 1
	6	2168,000	14,63388	731694,000	337,497	0,834	60,080	69,259	103,471				20,000	CLASE 1
	7	2168,000	13,52799	676399,500	311,992	0,868	62,488	72,034	107,618				20,000	CLASE 1
	8	2168,000	12,85036	642518,000	296,364	0,890	64,114	73,909	110,419				20,000	CLASE 1
	9	2168,000	12,49504	624752,000	288,170	0,903	65,019	74,953	111,978				20,000	CLASE 1
CUADRADO 35x35x2	10	1618,773	12,93124	646562,000	399,415	0,767	55,227	63,665	95,114				17,500	CLASE 1
	11	1618,773	14,24429	712214,500	439,972	0,731	52,620	60,660	90,624				17,500	CLASE 1
	12	1618,773	13,18538	659269,000	407,265	0,760	54,693	63,048	94,193				17,500	CLASE 1
	13	1618,773	13,08447	654223,500	404,148	0,763	54,903	63,291	94,555				17,500	CLASE 1
	14	1618,773	13,08334	654167,000	404,113	0,763	54,905	63,294	94,559				17,500	CLASE 1
	15	1618,773	14,32106	716053,000	442,343	0,729	52,479	60,497	90,381				17,500	CLASE 1
	16	1618,773	10,92219	546109,500	337,360	0,835	60,092	69,273	103,492				17,500	CLASE 1
	17	1618,773	9,435024	471751,200	291,425	0,898	64,655	74,533	111,350				17,500	CLASE 1
	18	1618,773	11,27995	563997,500	348,410	0,821	59,132	68,166	101,838				17,500	CLASE 1
CIRCULAR 40x2	19	2160,787	4,106992	205349,600	95,035	1,573				78,625	110,076	141,526	20,000	CLASE 1
	20	2160,787	7,312961	365648,050	169,220	1,178				58,922	82,491	106,060	20,000	CLASE 1
	21	2160,787	5,565347	278267,350	128,781	1,351				67,543	94,560	121,577	20,000	CLASE 1
	22	2160,787	2,870646	143532,300	66,426	1,881				94,045	131,663	169,281	20,000	CLASE 1
	23	2160,787	4,049695	202484,750	93,709	1,584				79,180	110,852	142,523	20,000	CLASE 1
	24	2160,787	3,661088	183054,400	84,717	1,666				83,276	116,586	149,897	20,000	CLASE 1
	25	2160,787	3,547799	177389,950	82,095	1,692				84,595	118,433	152,271	20,000	CLASE 1
	26	2160,787	2,943047	147152,350	68,101	1,858				92,881	130,033	167,186	20,000	CLASE 1
	27	2160,787	3,058623	152931,150	70,776	1,822				91,109	127,553	163,996	20,000	CLASE 1
CIRCULAR 30x2	28	1635,500	2,589629	129481,450	79,169	1,723				86,144	120,602	155,059	20,000	CLASE 1
	29	1635,500	3,302142	165107,100	100,952	1,526				76,286	106,801	137,315	15,000	CLASE 1
	30	1635,500	3,340556	167027,800	102,126	1,517				75,846	106,185	136,523	15,000	CLASE 1
	31	1635,500	1,696618	84830,900	51,868	2,129				106,427	148,998	191,569	15,000	CLASE 1
	32	1635,500	1,847489	92374,450	56,481	2,040				101,989	142,785	183,580	15,000	CLASE 1
	33	1635,500	3,85568	192784,000	117,875	1,412				70,598	98,838	127,077	15,000	CLASE 1
	34	1635,500	2,831165	141558,250	86,554	1,648				82,388	115,343	148,298	15,000	CLASE 1
	35	1635,500	2,849803	142490,150	87,123	1,642				82,118	114,965	147,812	15,000	CLASE 1
	36	1635,500	3,457756	172887,800	105,709	1,491				74,550	104,37	134,190	15,000	CLASE1

**Tabla 8.6 Clase resistente de probetas luz 1000 mm probetas expuestas a la intemperie**

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 1000mm											
CLASE	Nº	W (mm <sup>3</sup> )	C. Lim. elástico (KN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLím. elástico (N/mm <sup>2</sup> )	ε	εX50	εX70	εX90	d/t o c/t	Tipo de Sección
CIRCULAR CORROIDA 40x2	1	2160,787	2,536711	634177,750	293,494	0,895	44,741	62,637	80,534	20,000	CLASE 1
	2	2160,787	2,142473	535618,250	247,881	0,974	48,684	68,157	87,630	20,000	CLASE 1
	3	2160,787	2,471461	617865,250	285,945	0,907	45,328	63,459	81,590	20,000	CLASE 1
	4	2160,787	1,725921	431480,250	199,687	1,085	54,241	75,938	97,634	20,000	CLASE 1
	5	2160,787	3,17202	793005,000	366,998	0,800	40,010	56,014	72,019	20,000	CLASE 1
	6	2160,787	1,75589	438972,500	203,154	1,076	53,776	75,287	96,797	20,000	CLASE 1
	7	2160,787	2,155126	538781,500	249,345	0,971	48,540	67,957	87,373	20,000	CLASE 1
	8	2160,787	2,503909	625977,250	289,699	0,901	45,033	63,046	81,059	20,000	CLASE 1
	9	2160,787	1,99884	499710,000	231,263	1,008	50,402	70,563	90,724	20,000	CLASE 1
	10	2160,787	2,611026	652756,500	302,092	0,882	44,100	61,739	79,379	20,000	CLASE 1
	11	2160,787	1,776783	444195,750	205,571	1,069	53,459	74,843	96,227	20,000	CLASE 1
	12	2160,787	1,551728	387932,000	179,533	1,144	57,205	80,087	102,969	20,000	CLASE 1

**Tabla 8.7 Clase resistente de probetas luz 400 mm probetas expuestas a la intemperie**

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 400mm											
CLASE	Nº	W (mm <sup>3</sup> )	C. Lim. elástico (KN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLím. elástico (N/mm <sup>2</sup> )	ε	εX50	εX70	εX90	d/t o c/t	Tipo de Sección
CIRCULAR CORROIDA 40x2	1	2160,787	3,86124	386124,000	178,696	1,147	57,339	80,274	103,209	20,000	CLASE 1
	2	2160,787	0,7993517	79935,170	36,994	2,520	126,020	176,429	226,837	20,000	CLASE 1
	3	2160,787	2,977919	297791,900	137,816	1,306	65,291	91,407	117,524	20,000	CLASE 1
	4	2160,787	1,311595	131159,500	60,700	1,968	98,381	137,733	177,085	20,000	CLASE 1
	5	2160,787	2,838359	283835,900	131,358	1,338	66,877	93,628	120,378	20,000	CLASE 1
	6	2160,787	2,178218	217821,800	100,807	1,527	76,341	106,878	137,414	20,000	CLASE 1
	7	2160,787	1,909689	190968,900	88,379	1,631	81,532	114,145	146,758	20,000	CLASE 1
	8	2160,787	1,982444	198244,400	91,746	1,600	80,022	112,031	144,040	20,000	CLASE 1
	9	2160,787	1,616996	161699,600	74,834	1,772	88,604	124,046	159,488	20,000	CLASE 1
	10	2160,787	1,756234	175623,400	81,278	1,700	85,020	119,027	153,035	20,000	CLASE 1
	11	2160,787	1,389167	138916,700	64,290	1,912	95,594	133,832	172,070	20,000	CLASE 1
	12	2160,787	2,325589	232558,900	107,627	1,478	73,883	103,436	132,989	20,000	CLASE 1



Tabla 8.8 Clase resistente de probetas luz 200 mm probetas expuestas a la intemperie

CLASE RESISTENTE PROBETAS LUZ 200mm											
CLASE	Nº	W (mm <sup>3</sup> )	C. Lim. elástico (KN)	Momento elástico (Nmm)	ResistLím. elástico (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon$	$\varepsilon_{X50}$	$\varepsilon_{X70}$	$\varepsilon_{X90}$	d/t o c/t	Tipo de Sección
CIRCULAR CORROIDA 40x2	1	2160,787	3,067693	153384,650	70,986	1,819	90,974	127,364	163,754	20,000	CLASE 1
	2	2160,787	2,954149	147707,450	68,358	1,854	92,706	129,789	166,871	20,000	CLASE 1
	3	2160,787	2,334785	116739,250	54,026	2,086	104,280	145,992	187,704	20,000	CLASE 1
	4	2160,787	3,863333	193166,650	89,396	1,621	81,067	113,494	145,921	20,000	CLASE 1
	5	2160,787	3,860942	193047,100	89,341	1,622	81,092	113,529	145,966	20,000	CLASE 1
	6	2160,787	2,390456	119522,800	55,314	2,061	103,059	144,282	185,506	20,000	CLASE 1
	7	2160,787	2,665142	133257,100	61,671	1,952	97,603	136,645	175,686	20,000	CLASE 1
	8	2160,787	3,864959	193247,950	89,434	1,621	81,050	113,470	145,890	20,000	CLASE 1
	9	2160,787	3,811996	190599,800	88,209	1,632	81,611	114,255	146,900	20,000	CLASE 1
	10	2160,787	2,127754	106387,700	49,236	2,185	109,236	152,930	196,624	20,000	CLASE 1
	11	2160,787	2,527672	126383,600	58,490	2,004	100,222	140,311	180,400	20,000	CLASE 1
	12	2160,787	3,926784	196339,200	90,865	1,608	80,409	112,573	144,737	20,000	CLASE 1

A la vista de los cálculos efectuados en las tablas 8.3 a 8.8 todas las secciones pertenecen a la clase 1: Plástica, es decir, permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de los momentos.

### 8.3 Anexo 3: Resultados carga-desplazamiento

Tabla 8.9 Resultados carga y carrera de los perfiles tubulares adquiridos para los ensayos

ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN DE PERFILES TUBULARES DE ACERO ADQUIRIDOS										
VELOCIDAD	CLASE	TUBO	PESOS (Kg)	ESPESOR (MM)	CARGA 100 cm	CARRERA 100 cm	CARGA 40 cm	CARRERA	CARGA 40 cm	CARRERA
300mm/min		1	2307,30	1.75	5,567	57,55	12,623	17,43	18,36	21,99
		2	2362,90	1.75	4,751	71,26	11,077	15,21	17,42	10,08
		3	2292,20	2.00	5,671	54,15	12,845	15,72	17,90	7,64
150mm/min	40x40x2	4	2333,00	1.90	4,644	60,8	10,505	12,72	15,27	17,05
		5	2354,10	1.90	4,79	64,86	11,004	12,81	17,34	9,24
		6	2303,80	2.00	5,483	54,67	11,923	21,23	20,36	10,77
30mm/min		7	2538,10	2.00	4,655	60,9	10,359	97,12	16,23	11,40
		8	2336,30	1.80	4,528	66,53	6,357	13,41	15,90	12,11
		9	2337,70	1.90	4,525	66,73	10,307	11,58	15,89	12,16
300mm/min		10	1846,50	2.00	4,734	62,61	9,922	8,9	14,19	9,13
		11	1845,40	2.00	4,653	69,55	10,349	16,4	16,60	14,92
		12	1844,20	1.80	4,668	70,84	10.664	14,5	16,91	10,14
150mm/min	35x35x2	13	1845,50	1.80	4,674	65,92	10,51	15,3	16,54	10,70
		14	1898,50	1.90	4,725	69,89	10,693	14,01	17,25	11,03
		15	1904,10	2.00	4,725	75,64	10,822	15,04	17,62	11,00
30mm/min		16	1895,30	1.70	4,69	76,04	10,625	14,29	14,15	10,01
		17	1836,00	1.80	4,583	64,19	10,422	12,91	12,25	6,96
		18	1899,90	1.60	4,586	67,04	9,737	10,13	14,09	12,46
300mm/min		19	1706,00	1.70	2,969	131,2	3,693	34,79	5,77	41,53
		20	1790,20	2.00	3,386	78,74	3,544	27,66	10,51	42,84
		21	1726,20	1.80	3,037	92,02	3,832	37,29	8,85	36,74
150mm/min	40x2	22	1718,40	1.75	3,167	95,41	3,869	39,91	5,53	40,57
		23	1805,80	1.80	3,959	100,3	3,442	24,81	8,15	32,17
		24	1693,60	1.90	2,518	129,79	2,572	71,31	6,08	40,16
30mm/min		25	1803,30	1.80	3,327	87,05	3,011	28,86	8,57	31,25
		26	1715,30	2.00	3,204	100,91	2,346	58,78	5,39	40,53
		27	1715,80	1.90	2,482	119,72	1,657	46,44	5,33	40,53
300mm/min		28	1220,80	1.80	1,977	85,58	1,358	54,63	4,36	32,60
		29	1272,10	1.70	2,309	92,17	2,191	81,84	3,95	25,46
		30	1233,70	1.85	2,276	125,53	2,713	95,12	3,94	26,75
150mm/min	30x2	31	1236,60	1.60	2,345	119,65	2,186	78,11	3,38	24,00
		32	1274,50	1.80	2,389	125,5	1,185	43,24	2,22	58,56
		33	1283,00	1.90	1,851	120,49	1,501	57,54	5,36	43,37
30mm/min		34	1238,10	1.85	2,091	129,16	2,809	103,72	4,43	34,55
		35	1274,50	1.85	1,985	125,93	0,831	41,83	4,30	34,18
		36	1223,00	1.90	1,694	122,23	3,498	47,6	4,58	33,84

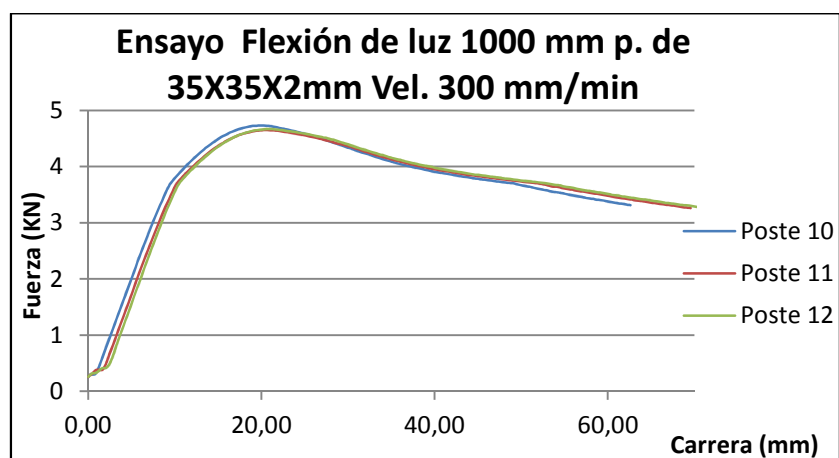
Tabla 8.10 Resultados carga y carrera de los perfiles tubulares conservados a la intemperie

ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN DE PERFILES TUBULARES DE ACERO CONSERVADOS A LA INTEMPERIE					
LOTE 1		VELOCIDAD 300 mm/min			
LUZ ENSAYO mm	1000	400	200	SECCIÓN	ESPESOR
Perfil 11	3,345	5,460	6,740	40	2
Perfil 12	3,207	0,810	7,632	40	2
Perfil 13	3,316	4,194	3,879	40	2
Perfil 14	2,463	1,558	5,502	40	2
LOTE 2		VELOCIDAD 150 mm/min			
LUZ ENSAYO mm	1000	400	200	SECCIÓN	ESPESOR
Perfil 15	3,872	3,897	5,731	40	2
Perfil 16	2,564	2,513	2,806	40	2
Perfil 17	2,910	3,864	4,379	40	2
Perfil 18	3,182	2,124	5,055	40	2
LOTE 3		VELOCIDAD 30 mm/min			
LUZ ENSAYO mm	1000	400	200	SECCIÓN	ESPESOR
Perfil 19	2,399	1,956	5,516	40	2
Perfil 20	3,073	2,073	3,915	40	2
Perfil 21	2,252	2,022	3,710	40	2
Perfil 22	2,120	3,115	5,135	40	2

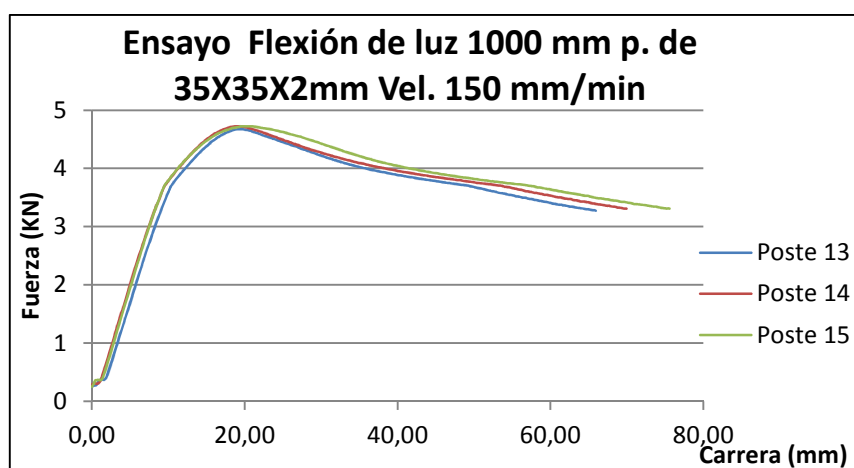
## 8.4 Anexo 4: Diagramas carga-desplazamiento

### 8.4.1 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 1000 mm y perfiles adquiridos

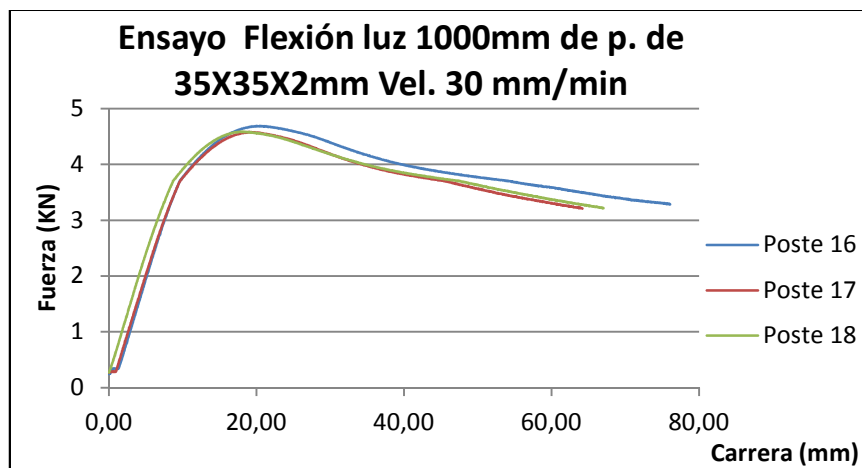
Gráfica 8.1 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 1000 mm y velocidad de 300 mm/min



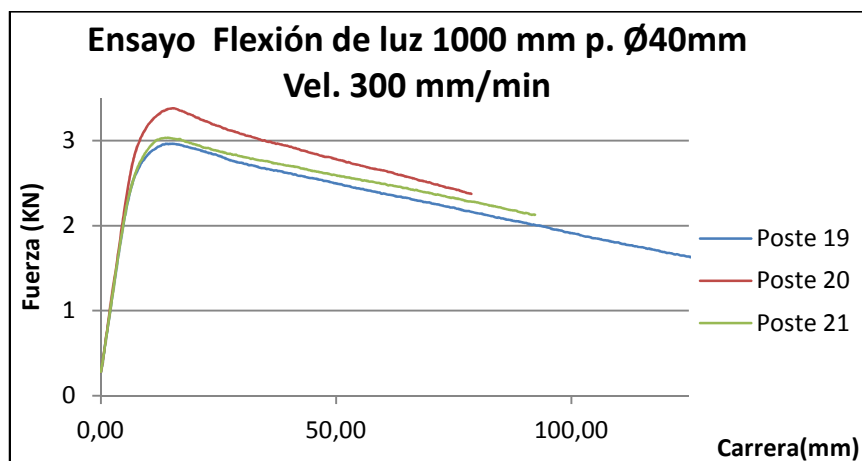
Gráfica 8.2 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000 mm y velocidad 150 mm/min.



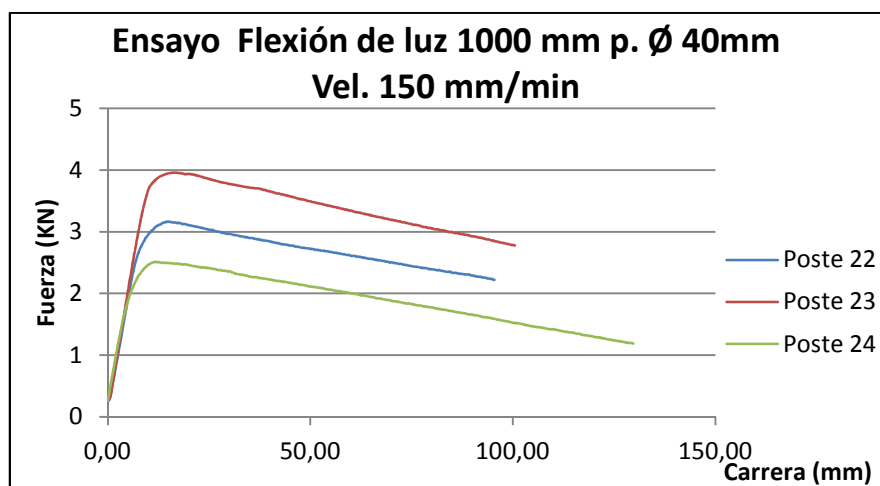
Gráfica 8.3 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.



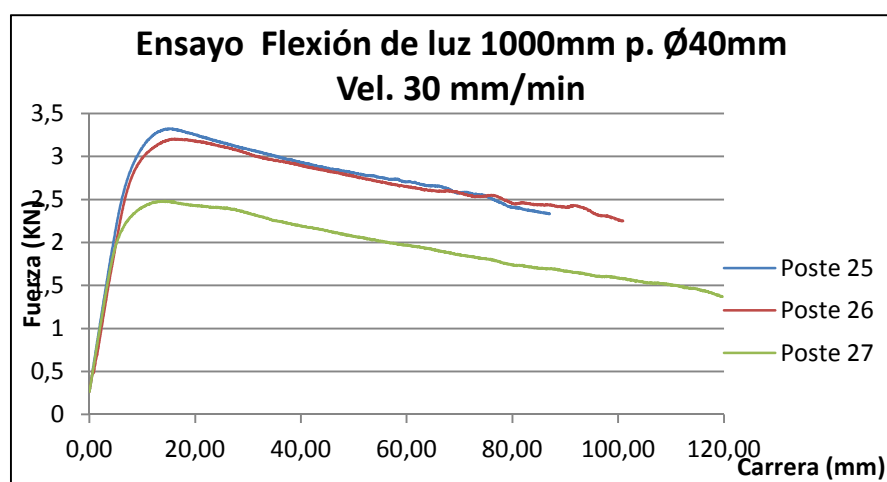
Gráfica 8.4 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000 mm y velocidad 300 mm/min.



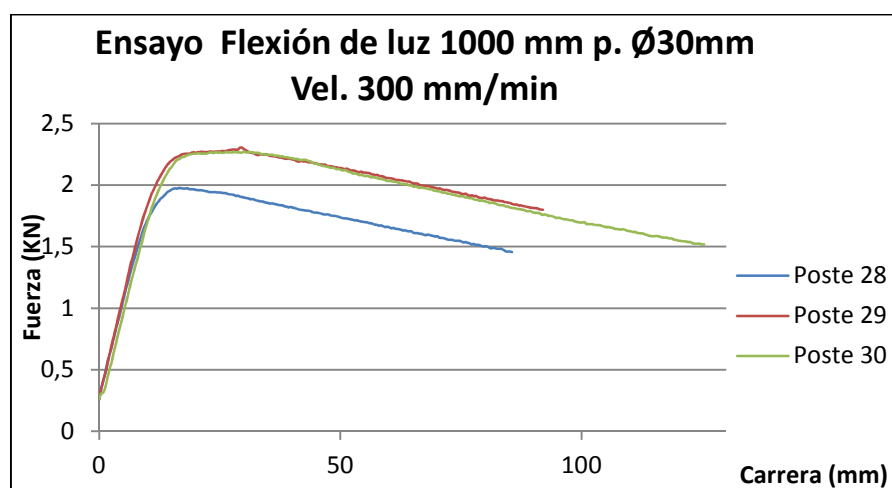
Gráfica 8.5 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000 mm y velocidad 300 mm/min



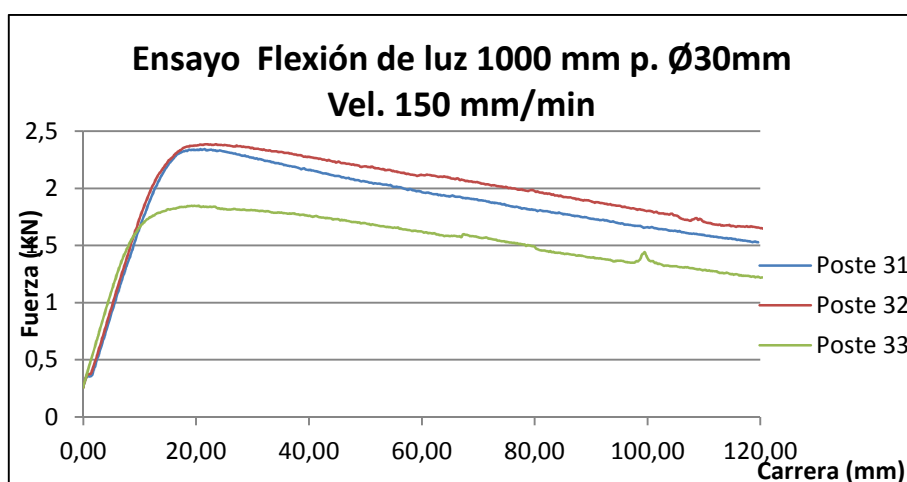
Gráfica 8.6 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.



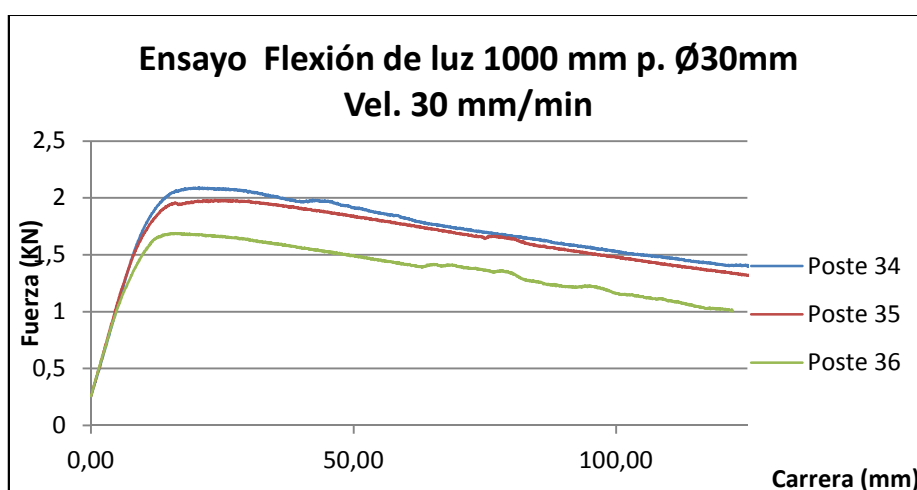
Gráfica 8.7 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.8 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

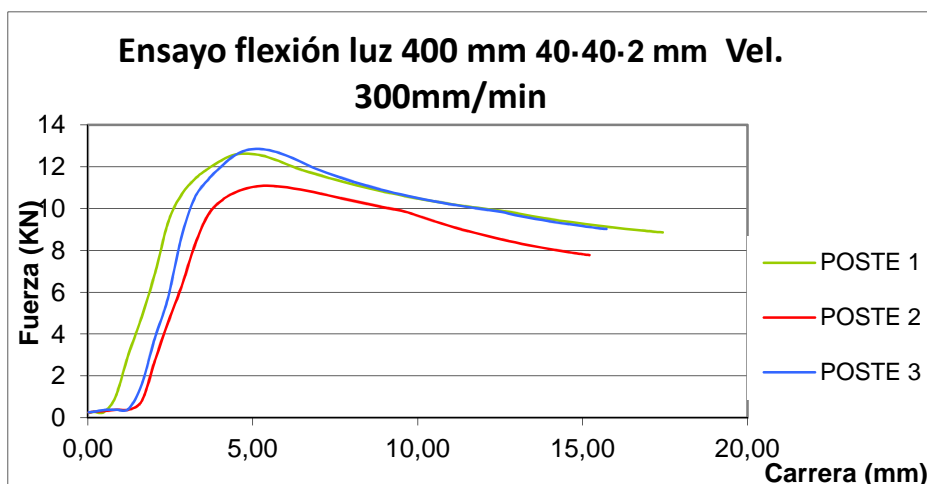


Gráfica 8.9 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

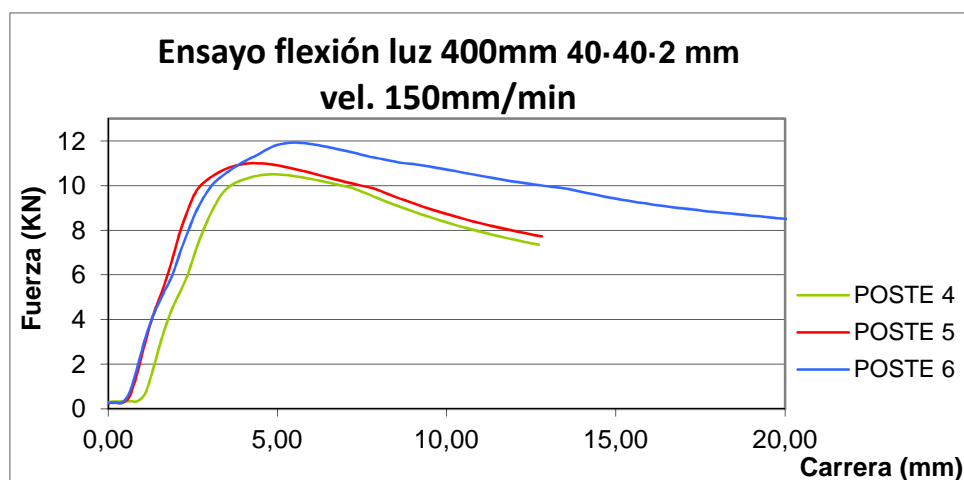


#### 8.4.2 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 400 mm y perfiles adquiridos

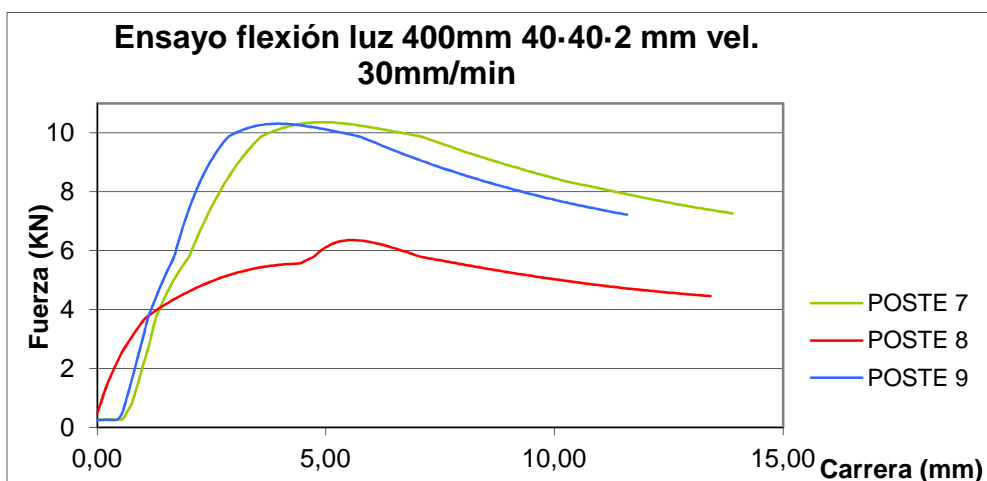
Gráfica 8.10 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.



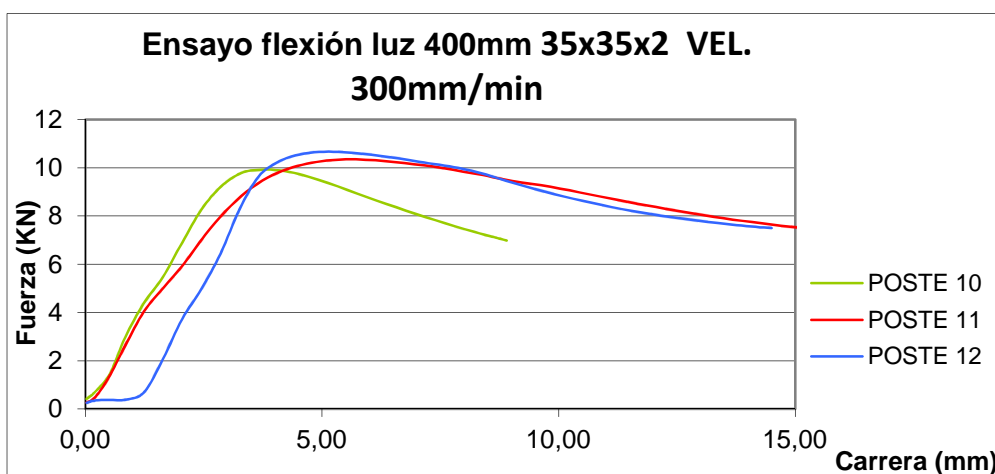
Gráfica 8.11 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.



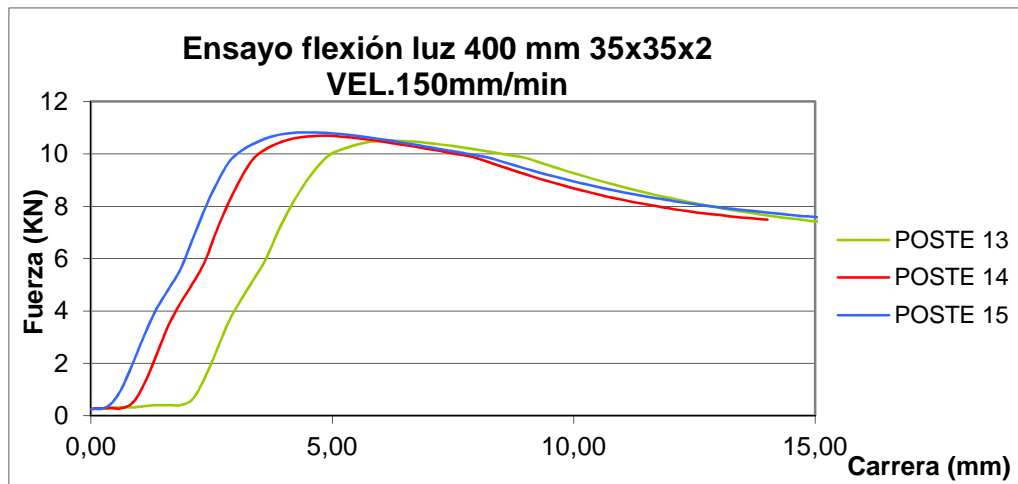
Gráfica 8.12 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.



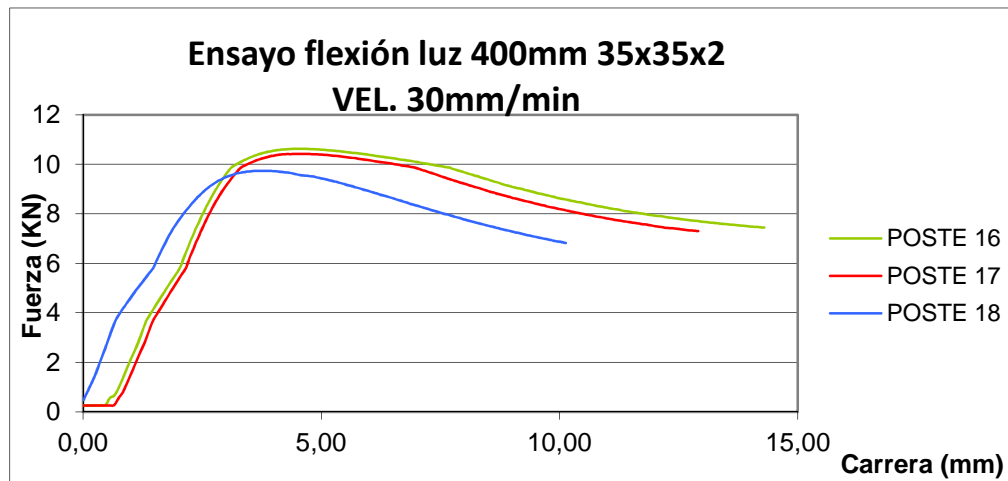
Gráfica 8.13 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 300 mm/min.



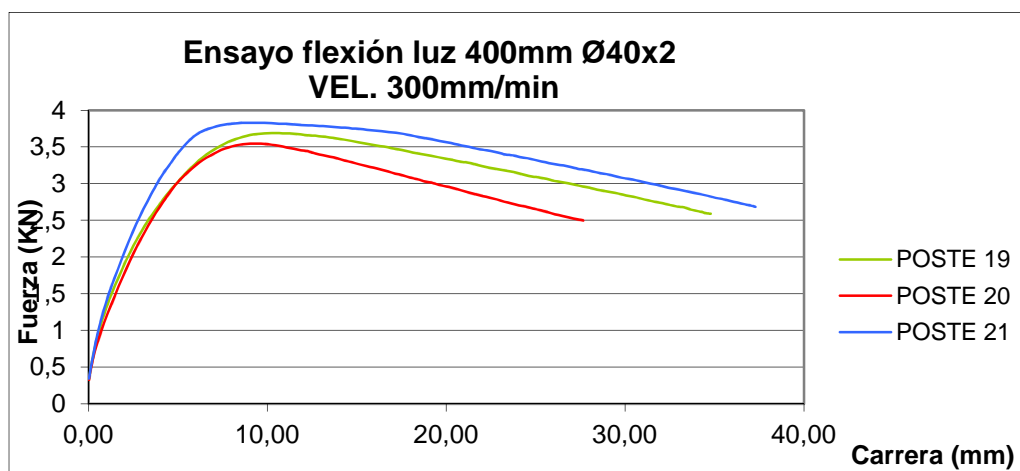
Gráfica 8.14 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.



Gráfica 8.15 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.

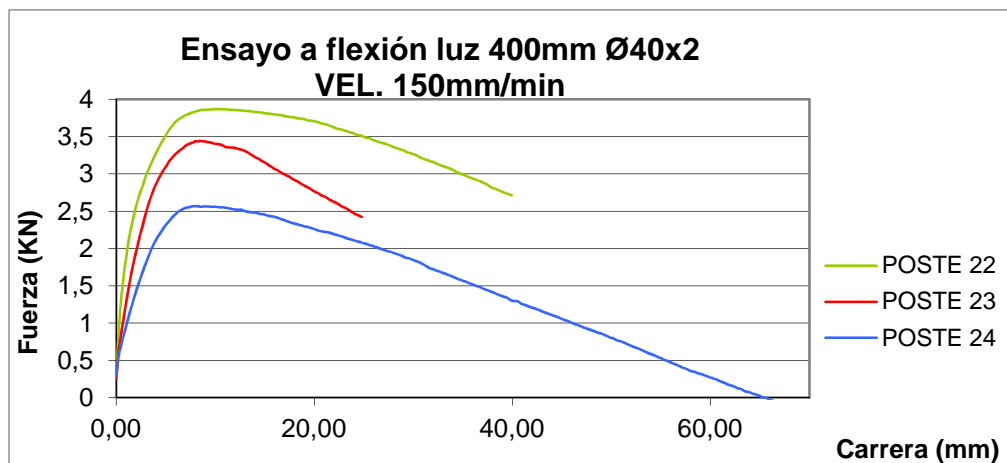


Gráfica 8.16 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 300 mm/min.

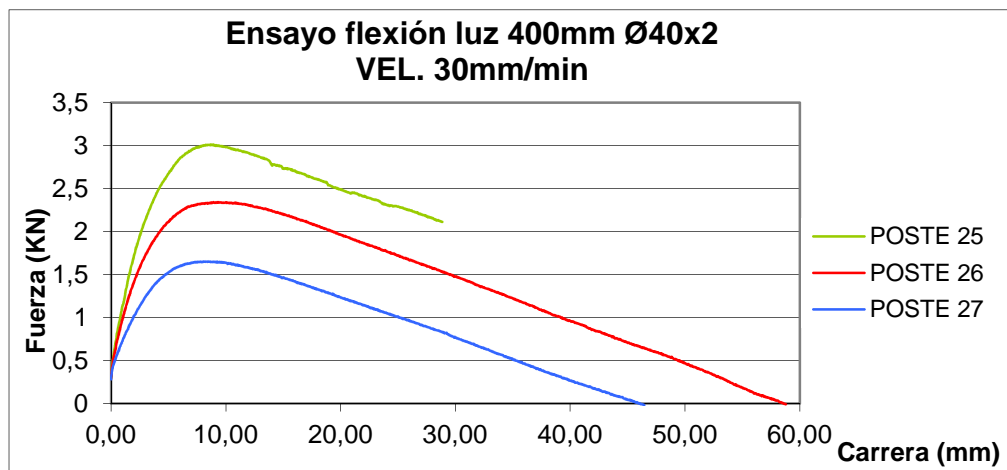




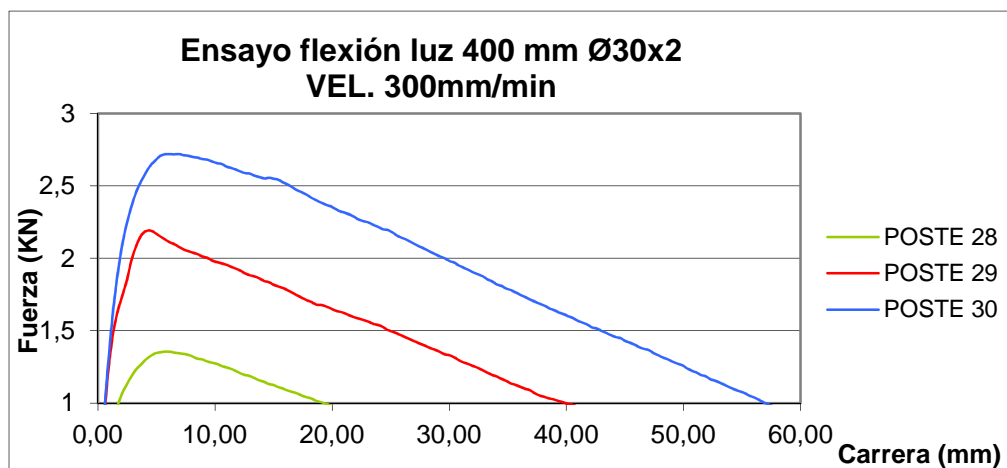
Gráfica 8.17 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.



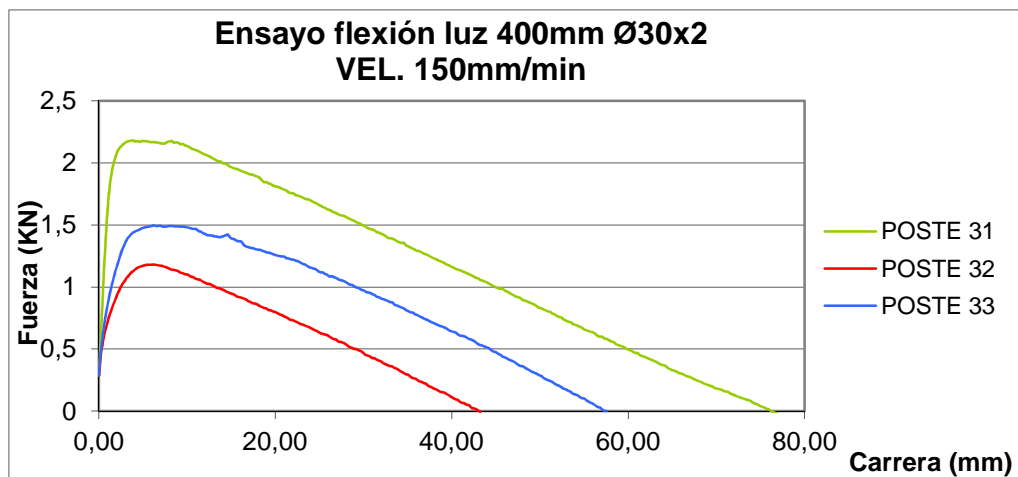
Gráfica 8.18 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.



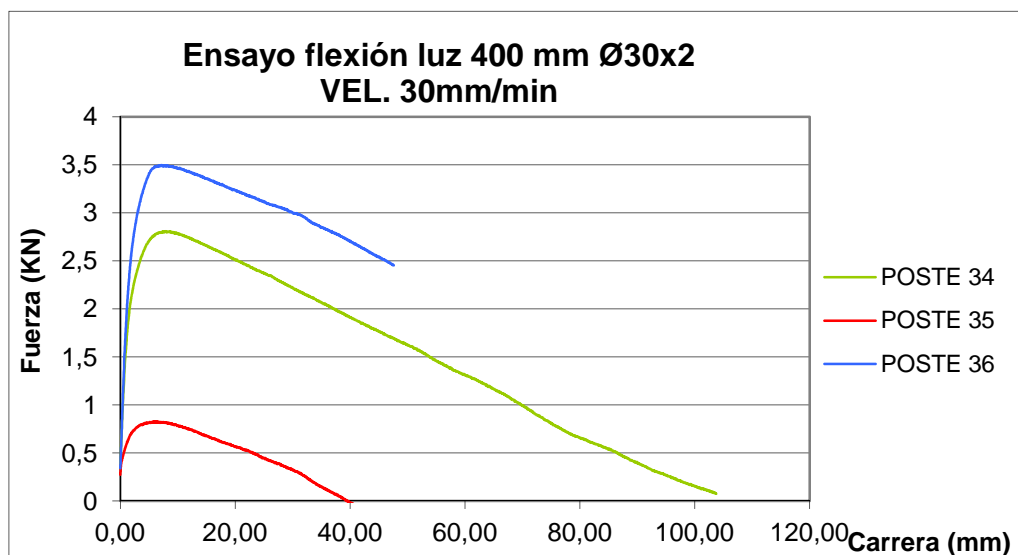
Gráfica 8.19 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.20 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.

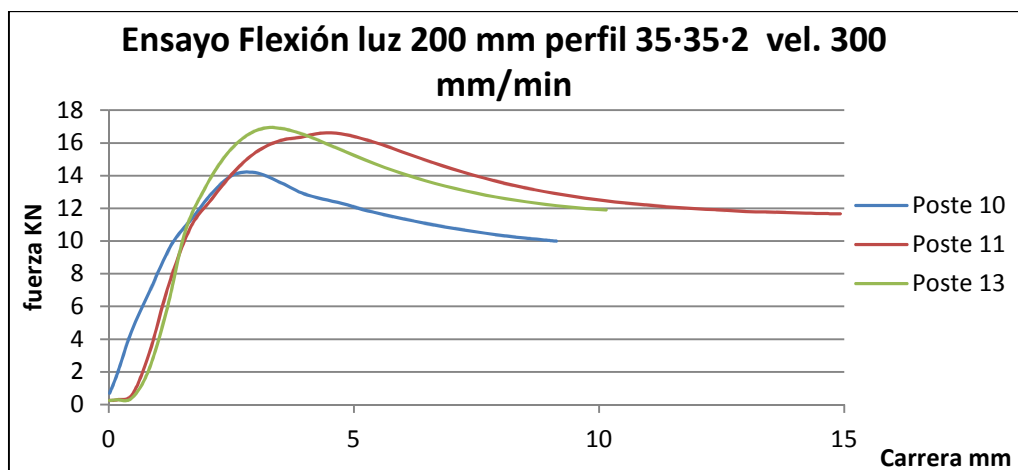


Gráfica 8.21 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 30 mm/min.

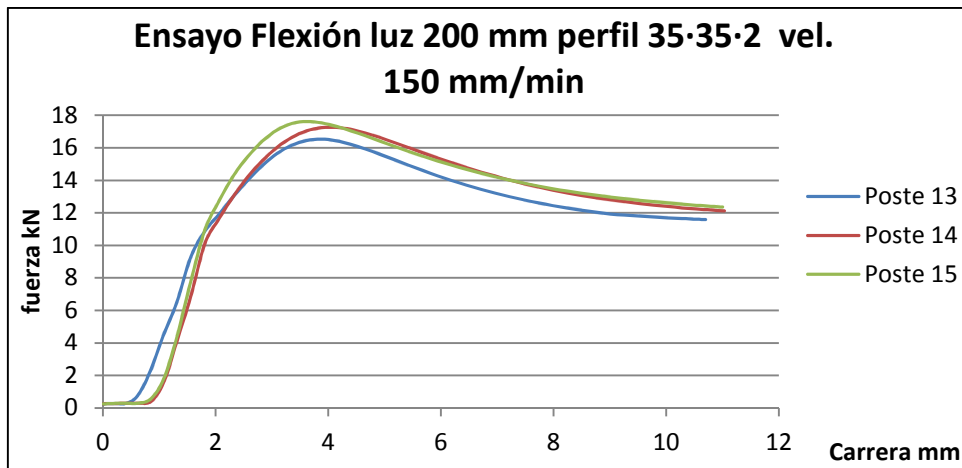


#### 8.4.3 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 200 mm y perfiles adquiridos

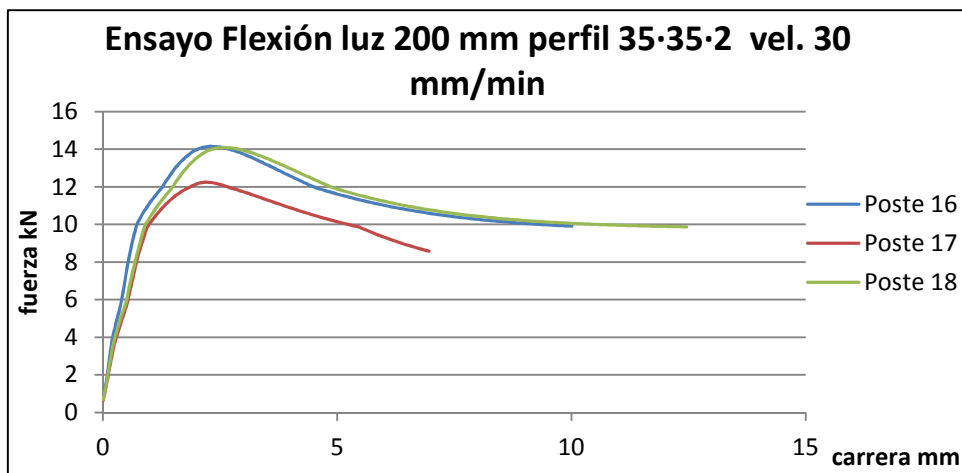
Gráfica 8.22 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 300 mm/min.



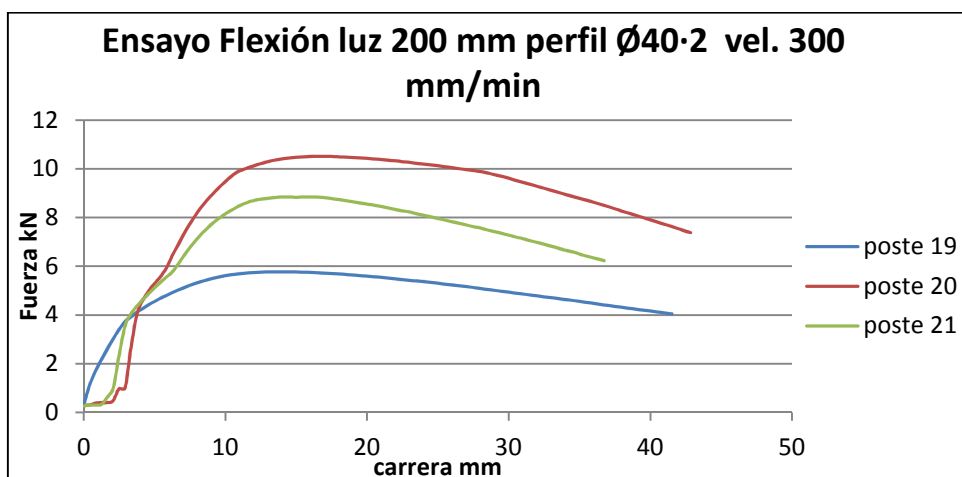
Gráfica 8.23 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 150 mm/min.



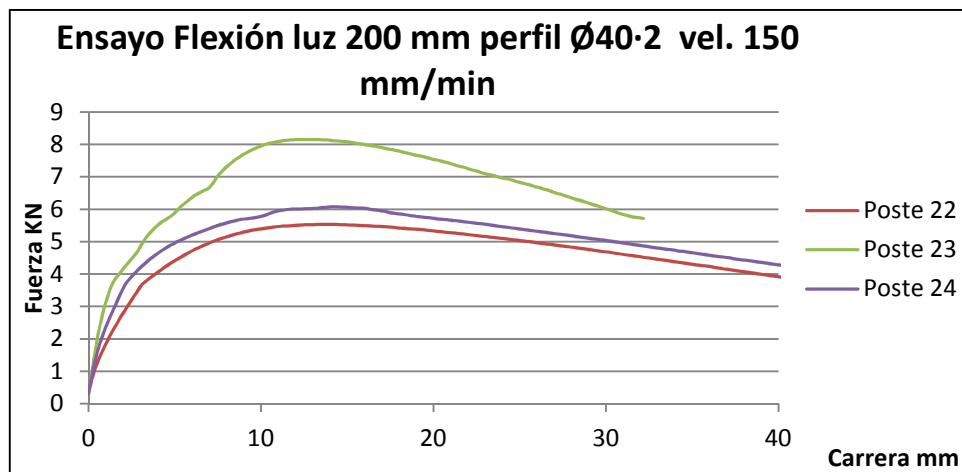
Gráfica 8.24 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 30 mm/min.



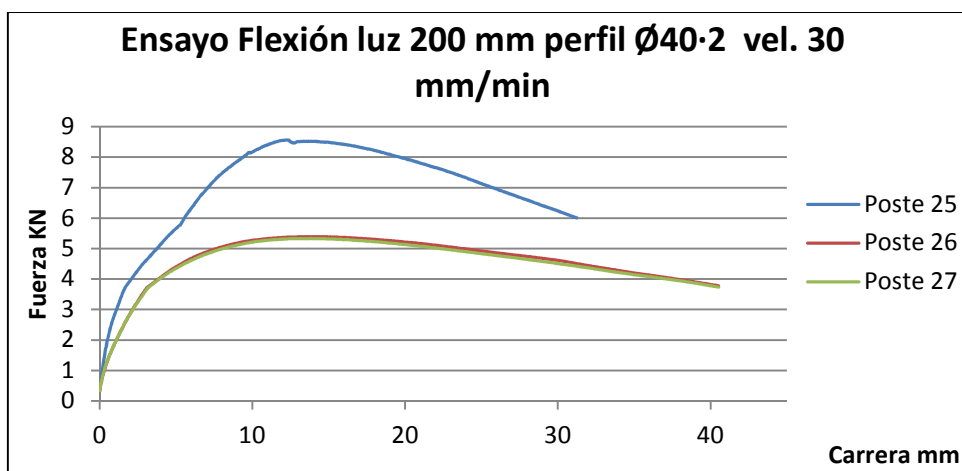
Gráfica 8.25 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 300 mm/min.



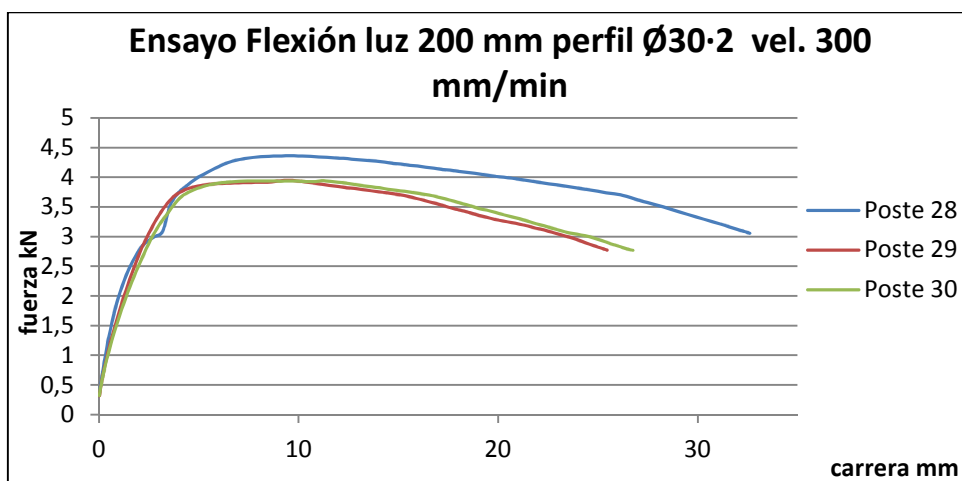
Gráfica 8.26 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 150 mm/min.



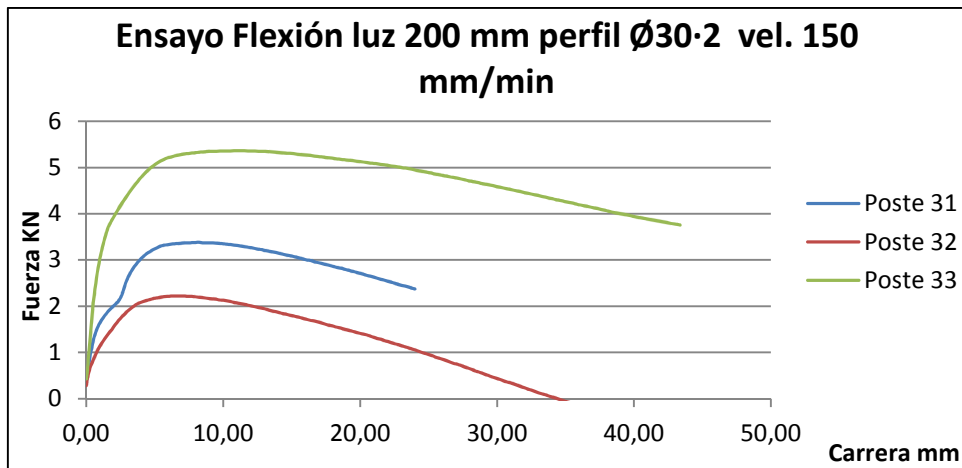
Gráfica 8.27 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 30 mm/min.



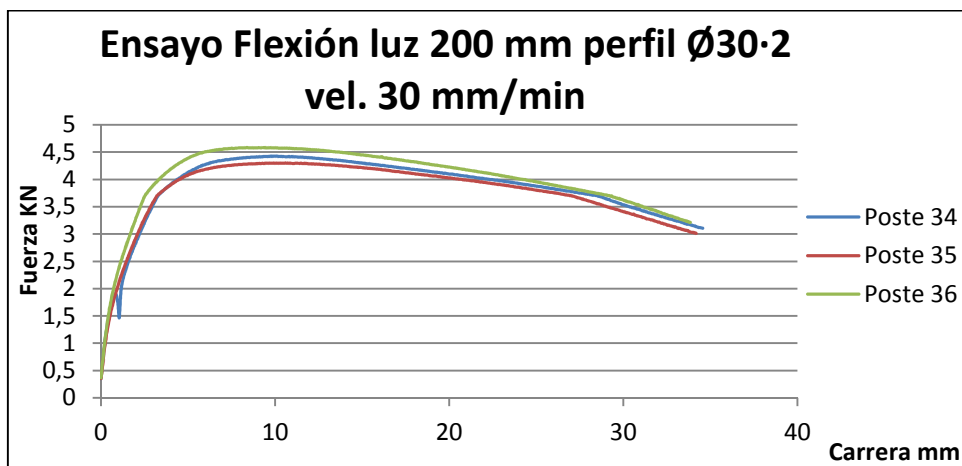
Gráfica 8.28 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.29 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 150 mm/min.

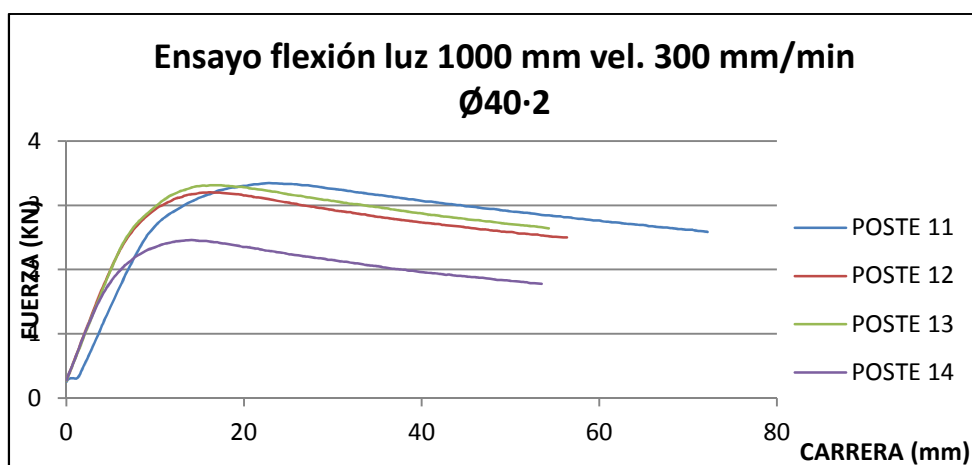


Gráfica 8.30 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 30 mm/min.

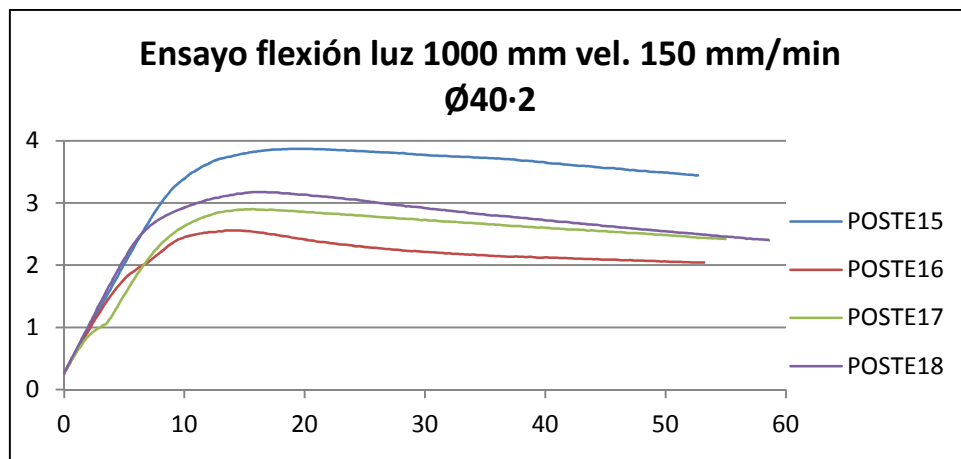


#### 8.4.4 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 1000 mm y perfiles expuestos a la intemperie

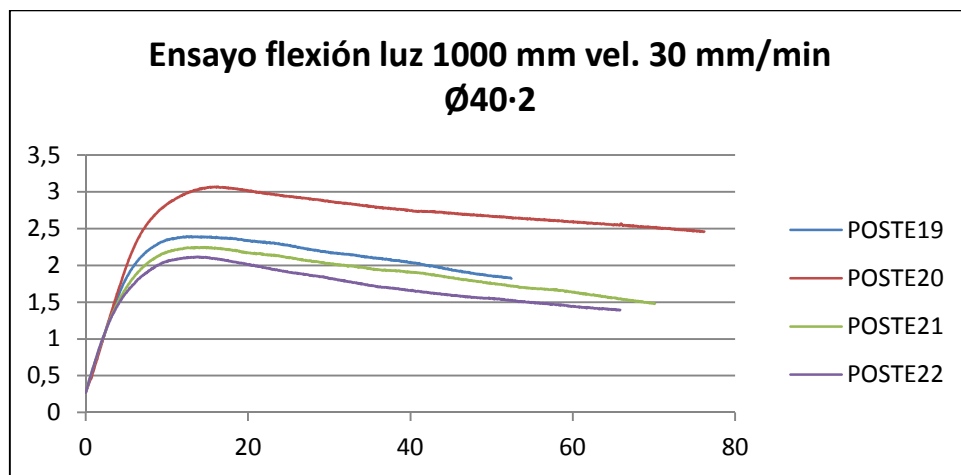
Gráfica 8.31 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.32 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 150 mm/min.

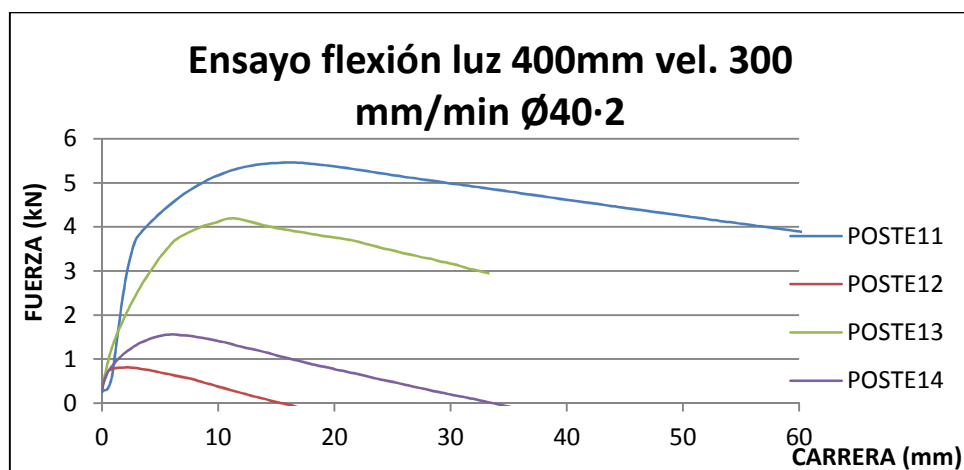


Gráfica 8.33 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 1000mm y velocidad 30 mm/min.

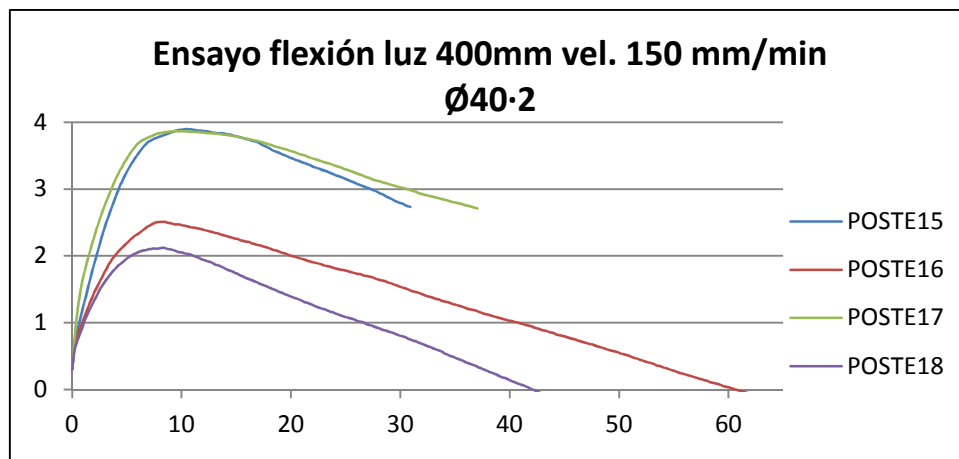


#### 8.4.5 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 400 mm y perfiles expuestos a la intemperie

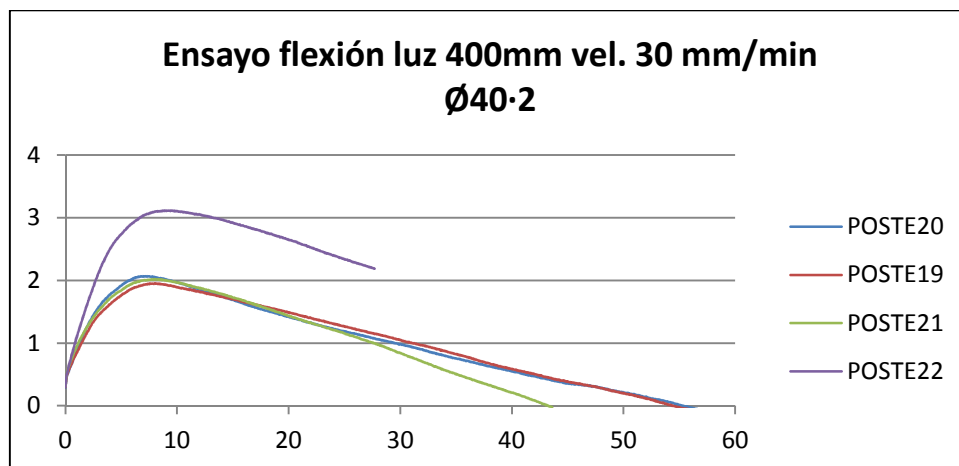
Gráfica 8.34 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.35 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 150 mm/min.

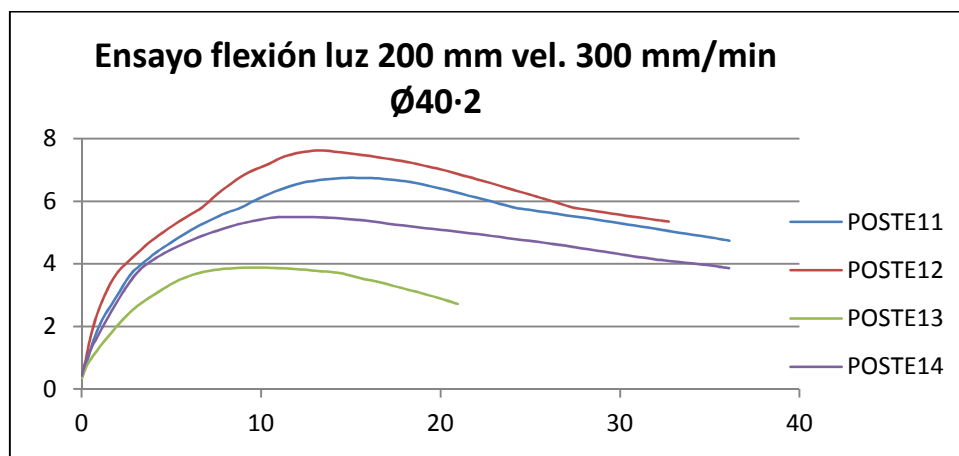


Gráfica 8.36 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 400mm y velocidad 30 mm/min.

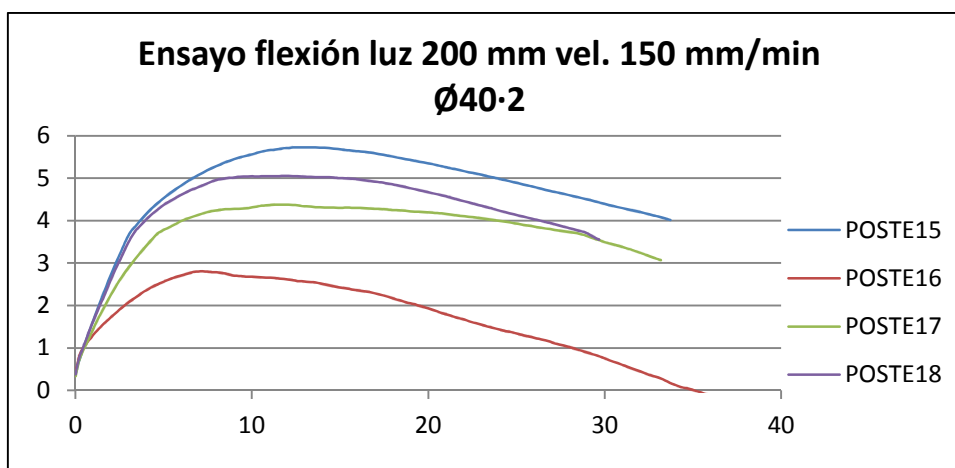


#### 8.4.6 Diagramas carga-desplazamiento para una luz de 200 mm y perfiles expuestos a la intemperie

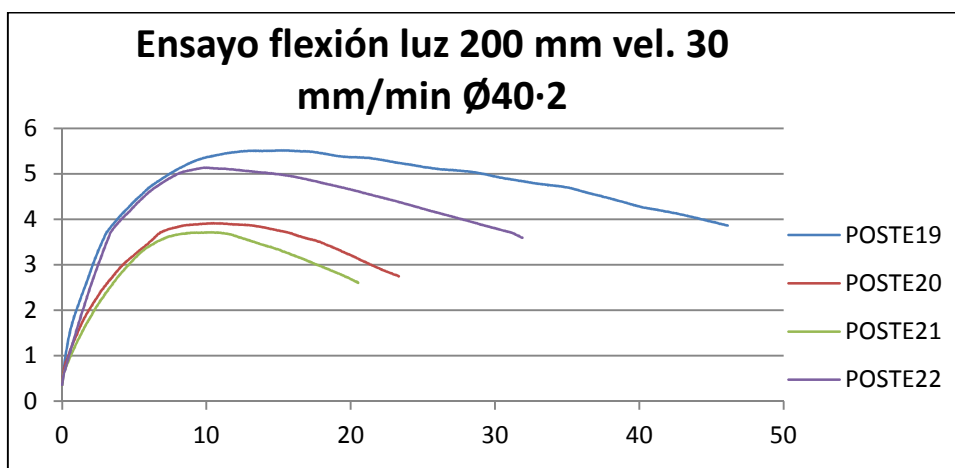
Gráfica 8.37 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 300 mm/min.



Gráfica 8.38 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 150 mm/min.



Gráfica 8.39 Diagrama carga-desplazamiento para luz de 200mm y velocidad 30 mm/min.



## 8.5 Anexo 5: Resultados obtenidos y cálculos de energías

### 8.5.1 Cálculos de energías en perfiles adquiridos

Tabla 8.11 Resultados luz 1000mm para las secciones 35\*35\*2mm.

Luz 1000 mm 35*35*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P10	3,525	4,733	8,920	19,841	62,605	15,267	62,366	231,920
		P11	3,681	4,653	10,141	20,254	69,555	17,451	60,872	253,463
		P12	3,600	4,668	10,146	20,683	70,838	16,270	61,518	257,739
	150 mm/min	P13	3,349	4,673	9,256	19,225	65,925	14,335	56,188	237,841
		P14	3,540	4,722	9,003	19,225	69,938	15,710	59,700	258,496
		P15	3,755	4,724	9,768	20,503	75,585	18,160	65,294	281,924
	30 mm/min	P16	3,765	4,687	9,981	20,595	76,083	19,214	65,726	281,093
		P17	3,583	4,580	9,215	19,016	64,191	16,914	58,441	231,873
		P18	3,597	4,586	8,353	18,001	67,040	16,748	57,778	246,503



**Tabla 8.12 Resultados luz 400 mm para las secciones 35\*35\*2mm**

	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
Luz 400 mm 35*35*2 mm	300 mm/min	P10	8,278	9,922	2,456	3,705	8,902	8,758	20,120	65,156
		P11	9,009	10,349	3,406	5,510	16,400	14,969	35,571	132,111
		P12	9,634	10,644	3,659	4,840	14,498	10,999	22,948	111,491
	150 mm/min	P13	9,484	10,510	4,679	6,222	15,304	13,164	28,821	110,428
		P14	9,805	10,693	3,358	4,905	14,007	12,021	28,084	110,870
		P15	9,695	10,822	2,860	4,404	15,036	11,237	27,274	125,228
	30 mm/min	P16	9,659	10,625	3,023	4,549	14,294	12,608	28,401	116,243
		P17	9,460	10,422	3,125	4,600	12,910	12,306	27,313	101,094
		P18	8,133	9,737	2,163	3,792	10,128	9,849	24,930	77,952

**Tabla 8.13 Resultados luz 200 mm para las secciones 35\*35\*2mm**

	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
Luz 200 mm Ø40*2 mm	300 mm/min	P10	12,93	14,19	2,106	2,988	9,13	14,12	26,02	97,94
		P11	14,24	16,60	2,559	4,338	14,92	15,29	42,90	184,52
		P12	13,19	16,91	1,955	3,183	10,14	7,39	25,69	123,72
	150 mm/min	P13	13,08	16,54	2,333	3,874	10,70	11,83	35,05	127,21
		P14	13,08	17,25	2,328	4,137	11,03	9,08	37,41	135,43
		P15	14,32	17,62	2,324	3,621	11,00	9,91	30,90	137,74
	30 mm/min	P16	10,92	14,15	0,939	2,565	10,01	6,09	27,38	111,51
		P17	9,435	12,25	0,886	2,204	6,96	4,46	19,31	69,14
		P18	11,28	14,09	1,255	2,565	12,46	8,56	25,63	135,77

**Tabla 8.14 Resultados luz 1000mm para las secciones Ø40\*2mm.**

	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
Luz 1000 mm Ø40*2 mm	300 mm/min	P19	2,471	2,964	6,555	13,920	130,938	9,052	29,628	292,362
		P20	2,684	3,380	6,559	15,549	78,743	9,461	37,967	217,453
		P21	2,474	3,033	6,547	14,314	92,293	9,058	31,254	231,372
	150 mm/min	P22	2,475	3,164	6,701	14,881	95,451	8,551	32,645	248,438
		P23	3,688	3,958	10,023	16,157	100,477	19,73	43,542	328,206
		P24	2,273	2,514	7,467	11,818	129,745	10,65	21,168	241,916
	30 mm/min	P25	2,795	3,323	7,492	15,461	87,049	12,31	37,582	238,947
		P26	2,827	3,204	8,499	16,066	100,909	14,10	37,419	267,574
		P27	2,277	2,482	7,543	14,192	119,719	11,24	27,357	229,765

**Tabla 8.15 Resultados luz 400mm para las secciones Ø40\*2mm**

Luz 400 mm Ø40*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P19	2,500	3,689	3,343	10,648	34,790	5,070	29,177	106,436
		P20	2,601	3,544	3,765	9,440	27,661	5,771	24,089	79,805
		P21	2,943	3,829	3,695	9,414	37,289	6,460	26,920	120,887
	150 mm/min	P22	2,179	3,869	1,362	10,537	39,910	1,797	33,386	134,123
		P23	2,280	3,442	2,616	8,494	24,807	3,556	21,611	70,693
		P24	2,249	2,569	4,663	8,240	71,094	6,689	15,491	97,573
	30 mm/min	P25	2,037	3,011	2,717	8,911	28,859	3,518	20,337	71,561
		P26	1,803	2,341	3,327	8,910	46,444	4,025	16,199	79,183
		P27	1,339	1,652	3,531	8,051	58,779	3,220	10,244	44,065

**Tabla 8.16 Resultados luz 200mm para las secciones Ø40\*2mm**

Luz 200 mm Ø40*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P19	4,107	5,77	3,754	14,13	41,53	9,28	63,83	202,33
		P20	7,313	10,51	7,056	16,22	42,84	20,87	20,87	359,63
		P21	5,565	8,85	5,852	15,95	36,74	15,53	95,47	256,47
	150 mm/min	P22	2,871	5,53	2,108	13,6	40,57	3,53	58,93	189,59
		P23	4,05	8,15	1,854	12,83	32,17	4,60	77,98	215,88
		P24	3,661	6,08	2,11	14,36	40,16	4,47	70,26	205,01
	30 mm/min	P25	3,548	8,57	1,521	12,36	31,25	3,43	75,51	217,73
		P26	2,943	5,39	2,092	14,19	40,53	3,84	61,95	186,29
		P27	3,059	5,33	2,255	13,89	40,53	4,33	59,71	183,66

**Tabla 8.17 Resultados luz 1000mm para las secciones Ø30\*2mm.**

Luz 1000 mm Ø30*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P28	1,750	1,977	10,400	16,649	85,583	10,880	22,715	141,928
		P29	1,960	2,304	11,246	29,624	91,971	12,917	53,853	181,553
		P30	2,042	2,272	13,319	29,999	125,394	15,459	52,680	233,186
	150 mm/min	P31	2,111	2,343	13,860	21,530	119,598	16,241	34,350	220,570
		P32	2,100	2,386	13,095	21,782	125,179	15,386	35,981	243,397
		P33	1,645	1,848	9,764	19,733	120,353	9,977	27,793	183,733
	30 mm/min	P34	1,769	2,091	10,434	20,490	129,162	11,020	31,158	218,172
		P35	1,640	1,981	9,571	25,619	125,913	9,612	40,341	206,187
		P36	1,283	1,689	7,340	15,868	122,206	5,958	19,302	165,189

**Tabla 8.18 Resultados luz 400mm para las secciones Ø30\*2mm**

Luz 400 mm Ø30*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P28	1,064	1,356	2,051	5,682	54,629	1,454	5,968	37,674
		P29	1,989	2,191	2,871	4,471	81,843	3,694	7,060	77,998
		P30	2,361	2,712	2,873	7,305	94,929	4,199	15,816	125,895
	150 mm/min	P31	2,096	2,180	2,127	3,896	77,947	2,994	6,798	90,520
		P32	0,983	1,181	2,368	6,193	57,544	1,659	5,944	52,136
		P33	1,423	1,497	3,628	6,185	43,237	3,657	7,404	29,342
	30 mm/min	P34	2,315	2,809	2,565	7,900	103,724	4,170	18,397	155,803
		P35	0,677	0,828	1,644	6,273	41,827	0,862	4,493	20,340
		P36	2,615	3,496	2,005	7,188	47,599	3,360	20,189	142,886

**Tabla 8.19 Resultados luz 200mm para las secciones Ø30\*2mm**

Luz 400 mm Ø30*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P28	2,59	4,36	1,7	9,361	32,60	2,49	31,70	122,48
		P29	3,302	3,95	2,903	9,497	25,46	5,47	30,60	86,11
		P30	3,341	3,94	3,321	11,16	26,75	6,48	36,64	90,58
	150 mm/min	P31	1,697	3,38	1,104	8,232	24,00	1,21	21,70	68,61
		P32	1,847	2,22	2,857	6,95	58,56	3,46	12,12	22,56
		P33	3,856	5,36	1,854	11,29	43,37	4,56	51,97	202,44
	30 mm/min	P34	2,831	4,43	1,991	11,7	34,55	3,70	44,14	133,08
		P35	2,85	4,30	1,89	10,59	34,18	3,54	38,59	129,27
		P36	3,458	4,58	2,204	8,099	33,84	5,00	30,28	135,99

## 8.5.2 Cálculos de energías en perfiles conservados a la intemperie

**Tabla 8.20 Perfiles conservados a la intemperie luz 1000mm para las secciones Ø40\*2mm**

Luz 1000 mm Intemperie Ø40*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P11	2,537	3,345	9,132	22,827	72,196	11,404	53,668	200,033
		P12	2,142	3,201	5,470	16,250	56,367	6,364	37,435	150,906
		P13	2,471	3,312	6,657	17,433	54,324	8,940	41,921	151,404
		P14	2,537	3,345	9,132	22,827	72,196	11,404	53,668	200,033
	150 mm/min	P15	3,172	3,869	8,755	20,000	52,699	15,210	56,699	177,235
		P16	1,756	2,559	4,919	13,606	53,208	5,057	24,839	113,007
		P17	2,155	2,903	7,222	15,653	54,995	8,423	30,982	135,767
		P18	2,504	3,177	6,453	16,165	58,573	9,084	37,778	155,971
	30 mm/min	P19	1,999	2,389	5,969	14,192	52,434	7,299	26,167	107,620
		P20	2,611	3,070	7,944	16,321	76,193	12,436	36,939	199,956
		P21	1,777	2,247	5,511	14,599	70,103	6,226	25,524	129,159
		P22	1,552	2,117	4,497	13,735	65,837	4,466	22,481	111,187

**Tabla 8.21 Perfiles conservados a la intemperie luz 400mm para las secciones Ø40\*2mm**

Luz 400 mm Intemperie Ø40*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P11	3,861	5,460	3,331	16,231	62,084	6,113	70,068	283,800
		P12	0,799	0,811	1,250	2,069	71,158	0,784	1,441	7,593
		P13	2,978	4,194	4,134	11,113	33,253	7,446	33,712	113,855
		P14	1,312	1,558	2,915	6,186	81,441	2,631	7,407	29,512
	150 mm/min	P15	2,838	3,897	3,883	10,532	30,913	6,615	30,423	99,934
		P16	2,178	2,510	4,916	8,238	98,274	7,241	15,117	83,665
		P17	1,910	3,864	1,358	10,025	37,055	1,593	30,410	121,180
		P18	1,982	2,120	5,170	8,242	95,721	7,100	13,457	50,623
	30 mm/min	P19	1,617	1,954	3,988	8,048	78,685	4,477	11,943	57,946
		P20	1,756	2,068	3,881	7,080	72,689	4,604	10,847	57,527
		P21	1,389	2,019	2,412	7,949	43,595	2,353	12,386	50,698
		P22	2,326	3,115	3,480	9,470	27,691	5,048	22,365	71,660

**Tabla 8.22 Perfiles conservados a la intemperie luz 200mm para las secciones Ø40\*2mm**

Luz 200 mm Intemperie Ø40*2 mm	Vel.	Tub	Pe (KN)	Pmax (KN)	fe (mm)	fmax (mm)	fu (mm)	Ee (mmKN)	Emax (mmKN)	Eu (mmKN)
	300 mm/min	P11	3,068	6,749	2,078	14,924	36,099	3,500	74,000	197,000
		P12	2,954	7,626	1,259	13,261	32,716	1,870	72,100	199,000
		P13	2,335	3,879	2,499	9,517	20,956	3,310	27,100	67,200
		P14	3,863	5,500	3,355	11,665	36,078	7,440	48,200	165,000
	150 mm/min	P15	3,861	5,729	3,381	13,095	33,720	7,440	57,300	161,000
		P16	2,390	2,806	4,149	7,221	43,246	6,760	14,800	62,000
		P17	2,665	4,368	2,616	12,327	33,182	4,080	42,600	125,000
		P18	3,865	5,054	3,640	11,816	29,674	8,190	46,900	128,000
	30 mm/min	P19	3,812	5,515	3,333	15,111	46,125	8,270	67,910	217,889
		P20	2,128	3,914	2,107	10,485	23,333	3,011	31,288	76,211
		P21	2,528	3,712	3,379	10,231	20,516	5,491	28,712	62,177
		P22	3,927	5,134	3,887	9,926	31,893	9,280	37,668	136,968

## 8.6 Anexo 6: Resultados de flechas y momentos últimos

### 8.6.1 Resultados de flechas y momentos últimos en perfiles adquiridos

Tabla 8.23 Momentos últimos para luces de 1000 mm

Luz 1000 mm							
Sección	Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Ana. Plástico (N*mm)	fe (mm)	flecha analítica elastica (mm)	Mu Expe. Elastico (Nmm)	Mu Expe. Plástico (Nmm)
40*40*2	P1	862042,667	1018960,000	5,682	5,194	914497,500	1391408,500
	P2	862042,667	1018960,000	5,682	5,194	914497,500	1417781,500
	P3	862042,667	1018960,000	6,096	5,197	915078,750	1187321,000
	P4	862042,667	1018960,000	7,208	5,119	901366,000	1161068,250
	P5	862042,667	1018960,000	6,695	5,007	881646,750	1197317,500
	P6	862042,667	1018960,000	5,418	5,330	938420,000	1370634,500
	P7	862042,667	1018960,000	5,309	4,522	796164,250	1163718,750
	P8	862042,667	1018960,000	5,918	4,505	793168,500	1131305,750
	P9	862042,667	1018960,000	6,476	5,056	890284,250	1131323,000
35*35*2	P10	645806,857	768685,000	8,920	7,635	881244,250	1183210,000
	P11	645806,857	768685,000	10,141	7,973	920231,500	1163164,000
	P12	645806,857	768685,000	10,146	7,797	899880,500	1167055,750
	P13	645806,857	768685,000	9,256	7,254	837215,750	1168231,750
	P14	645806,857	768685,000	9,003	7,668	885052,000	1180450,250
	P15	645806,857	768685,000	9,768	8,133	938703,750	1180986,500
	P16	645806,857	768685,000	9,981	8,156	941334,000	1171754,250
	P17	645806,857	768685,000	9,215	7,761	895742,250	1144955,000
	P18	645806,857	768685,000	8,353	7,792	899334,000	1146589,750
Ø40*2	P19	507785,045	862042,667	6,555	5,956	617747,250	740950,500
	P20	507785,045	862042,667	6,559	6,470	671032,750	845104,000
	P21	507785,045	862042,667	6,547	5,964	618557,750	758127,750
	P22	507785,045	862042,667	6,701	5,967	618857,750	790963,750
	P23	507785,045	862042,667	10,023	8,889	921967,750	989547,500
	P24	507785,045	862042,667	7,467	5,480	568343,000	628484,500
	P25	507785,045	862042,667	7,492	6,737	698746,500	830676,750
	P26	507785,045	862042,667	8,499	6,813	706660,750	801073,500
	P27	507785,045	862042,667	7,543	5,487	569150,750	620386,000
Ø30*2	P28	203616,045	345669,333	10,400	10,520	437533,250	494227,750
	P29	203616,045	345669,333	11,246	11,784	490108,750	575885,500
	P30	203616,045	345669,333	13,319	12,272	510408,500	568034,750
	P31	203616,045	345669,333	13,860	12,691	527832,250	585687,250
	P32	203616,045	345669,333	13,095	12,622	524963,750	596411,500
	P33	203616,045	345669,333	9,764	9,891	411350,750	461883,250
	P34	203616,045	345669,333	10,434	10,633	442236,000	522716,500
	P35	203616,045	345669,333	9,571	9,855	409879,000	495176,750
	P36	203616,045	345669,333	7,340	7,713	320774,250	422273,250

Tabla 8.24 Momentos últimos para luces de 400 mm

Luz 400 mm							
Sección	Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Ana. Plástico (N*mm)	fe (mm)	flecha analítica elastica (mm)	Mu Expe. Elastico (N*mm)	Mu Expe. Plástico (N*mm)
40*40*2	P1	862042,667	1018960,000	2,847	0,971	1068744,000	1262297,000
	P2	862042,667	1018960,000	3,648	0,882	970789,200	1107737,000
	P3	862042,667	1018960,000	3,218	0,949	1044537,000	1284531,000
	P4	862042,667	1018960,000	3,123	0,821	903205,300	1050512,000
	P5	862042,667	1018960,000	2,605	0,887	976328,300	1100394,000
	P6	862042,667	1018960,000	2,927	0,884	972914,000	1192334,000
	P7	862042,667	1018960,000	2,823	0,761	837385,000	1035935,000
	P8	862042,667	1018960,000	0,971	0,322	354681,800	635725,500
	P9	862042,667	1018960,000	2,465	0,817	899119,500	1030723,000
35*35*2	P10	645806,857	768685,000	2,456	1,148	827794,800	992214,900
	P11	645806,857	768685,000	3,406	1,249	900851,500	1034937,000
	P12	645806,857	768685,000	3,659	1,335	963373,100	1064441,000
	P13	645806,857	768685,000	4,679	1,315	948373,700	1050954,000
	P14	645806,857	768685,000	3,358	1,359	980502,000	1069257,000
	P15	645806,857	768685,000	2,860	1,344	969494,000	1082209,000
	P16	645806,857	768685,000	3,023	1,339	965934,300	1062457,000
	P17	645806,857	768685,000	3,125	1,311	945986,300	1042224,000
	P18	645806,857	768685,000	2,163	1,127	813349,600	973739,700
Ø40*2	P19	507785,045	862042,667	3,343	0,386	250042,500	368897,200
	P20	507785,045	862042,667	3,765	0,401	260132,600	354374,900
	P21	507785,045	862042,667	3,695	0,454	294255,100	382948,300
	P22	507785,045	862042,667	1,362	0,336	217874,700	386929,900
	P23	507785,045	862042,667	2,616	0,352	228043,200	344215,500
	P24	507785,045	862042,667	4,663	0,347	224938,900	256883,600
	P25	507785,045	862042,667	2,717	0,314	203715,000	301096,500
	P26	507785,045	862042,667	3,327	0,278	180256,500	234078,300
	P27	507785,045	862042,667	3,531	0,207	133908,200	165178,300
Ø30*2	P28	203616,045	345669,333	2,051	0,409	106423,600	135582,300
	P29	203616,045	345669,333	2,871	0,765	198893,200	219121,800
	P30	203616,045	345669,333	2,873	0,908	236051,100	271207,600
	P31	203616,045	345669,333	2,127	0,807	209638,900	218049,300
	P32	203616,045	345669,333	2,368	0,378	98286,860	118113,300
	P33	203616,045	345669,333	3,628	0,548	142323,100	149678,400
	P34	203616,045	345669,333	2,565	0,891	231480,400	280854,200
	P35	203616,045	345669,333	1,644	0,260	67712,500	82799,210
	P36	203616,045	345669,333	2,005	1,006	261488,600	349645,200

Tabla 8.25 Momentos últimos para luces de 200 mm

Luz 200 mm							
Sección	Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Ana. Plástico (N*mm)	fe (mm)	flecha analítica elastica (mm)	Mu Expe. Elastico (N*mm)	Mu Expe. Plástico (N*mm)
40*40*2	P1	862042,667	1018960,000	5,004	0,148	653220,000	917857,500
	P2	862042,667	1018960,000	1,967	0,146	641493,000	871242,500
	P3	862042,667	1018960,000	1,585	0,156	687449,500	895121,000
	P4	862042,667	1018960,000	1,623	0,122	537718,500	763300,000
	P5	862042,667	1018960,000	1,311	0,115	504801,000	866750,000
	P6	862042,667	1018960,000	2,075	0,166	731694,000	1018100,000
	P7	862042,667	1018960,000	2,564	0,154	676399,500	811300,000
	P8	862042,667	1018960,000	2,718	0,146	642518,000	795150,000
	P9	862042,667	1018960,000	2,821	0,142	624752,000	794550,000
35*35*2	P10	645806,857	768685,000	2,106	0,224	646562,000	709250,000
	P11	645806,857	768685,000	2,559	0,247	712214,500	829950,000
	P12	645806,857	768685,000	1,955	0,228	659269,000	845400,000
	P13	645806,857	768685,000	2,333	0,227	654223,500	826800,000
	P14	645806,857	768685,000	2,328	0,227	654167,000	862650,000
	P15	645806,857	768685,000	2,324	0,248	716053,000	881000,000
	P16	645806,857	768685,000	0,939	0,189	546109,500	707600,000
	P17	645806,857	768685,000	0,886	0,163	471751,200	612250,000
	P18	645806,857	768685,000	1,255	0,195	563997,500	704700,000
Ø40*2	P19	507785,045	862042,667	3,754	0,079	205349,600	288600,000
	P20	507785,045	862042,667	7,056	0,141	365648,050	525600,000
	P21	507785,045	862042,667	5,852	0,107	278267,350	442500,000
	P22	507785,045	862042,667	2,108	0,055	143532,300	276650,000
	P23	507785,045	862042,667	1,854	0,078	202484,750	407600,000
	P24	507785,045	862042,667	2,110	0,071	183054,400	303750,000
	P25	507785,045	862042,667	1,521	0,068	177389,950	428250,000
	P26	507785,045	862042,667	2,092	0,057	147152,350	269650,000
	P27	507785,045	862042,667	2,255	0,059	152931,150	266600,000
Ø30*2	P28	203616,045	345669,333	1,700	0,125	129481,450	218100,000
	P29	203616,045	345669,333	2,903	0,159	165107,100	197550,000
	P30	203616,045	345669,333	3,321	0,161	167027,800	197050,000
	P31	203616,045	345669,333	1,104	0,082	84830,900	169050,000
	P32	203616,045	345669,333	2,857	0,089	92374,450	111150,000
	P33	203616,045	345669,333	1,854	0,185	192784,000	268150,000
	P34	203616,045	345669,333	1,991	0,136	141558,250	221350,000
	P35	203616,045	345669,333	1,890	0,137	142490,150	215100,000
	P36	203616,045	345669,333	2,204	0,166	172887,800	229150,000

## 8.6.2 Resultados de flechas y momentos últimos en perfiles conservados a la intemperie

Tabla 8.26 Momentos últimos para luces de 1000 mm

Ø40*2 Intemperie Luz 1000 mm								
Tubo	Mu Ana. Elástico (N/mm)	Mu Expe. Elástico (N/mm)	Variación (%)	Mu Ana. Plástico (N/mm)	Mu Expe. Plástico (N/mm)	Variación %	flecha analítica elastica (mm)	fexperim. (mm)
11	507785,05	634250,00	24,91	862042,67	836250,00	-2,99	6,12	9,13
12	507785,05	535500,00	5,46	862042,67	800250,00	-7,17	5,16	5,47
13	507785,05	617750,00	21,66	862042,67	828000,00	-3,95	5,96	6,66
14	507785,05	634250,00	24,91	862042,67	836250,00	-2,99	6,12	9,13
15	507785,05	793000,00	56,17	862042,67	967250,00	12,20	7,65	8,76
16	507785,05	439000,00	-13,55	862042,67	639750,00	-25,79	4,23	4,92
17	507785,05	538750,00	6,10	862042,67	725750,00	-15,81	5,19	7,22
18	507785,05	626000,00	23,28	862042,67	794250,00	-7,86	6,04	6,45
19	507785,05	499750,00	-1,58	862042,67	597250,00	-30,72	4,82	5,97
20	507785,05	652750,00	28,55	862042,67	767500,00	-10,97	6,29	7,94
21	507785,05	444250,00	-12,51	862042,67	561750,00	-34,84	4,28	5,51
22	507785,05	388000,00	-23,59	862042,67	529250,00	-38,61	3,74	4,50

Tabla 8.27 Momentos últimos para luces de 400 mm

Ø40*2 Intemperie Luz 400 mm								
Tubo	Mu Ana. Elástico (N/mm)	Mu Expe. Elástico (N/mm)	Variación (%)	Mu Ana. Plástico (N/mm)	Mu Expe. Plástico (N/mm)	Variación %	flecha analítica elastica (mm)	fexperim. (mm)
11	507785,05	386100,00	-23,96	862042,67	546000,00	-36,66	0,60	3,33
12	507785,05	79900,00	-84,26	862042,67	81100,00	-90,59	0,12	1,25
13	507785,05	297800,00	-41,35	862042,67	419400,00	-51,35	0,46	4,13
14	507785,05	131200,00	-74,16	862042,67	155800,00	-81,93	0,20	2,92
15	507785,05	283800,00	-44,11	862042,67	389700,00	-54,79	0,44	3,88
16	507785,05	217800,00	-57,11	862042,67	251000,00	-70,88	0,34	4,92
17	507785,05	191000,00	-62,39	862042,67	386400,00	-55,18	0,29	1,36
18	507785,05	198200,00	-60,97	862042,67	212000,00	-75,41	0,31	5,17
19	507785,05	161700,00	-68,16	862042,67	195400,00	-77,33	0,25	3,99
20	507785,05	175600,00	-65,42	862042,67	206800,00	-76,01	0,27	3,88
21	507785,05	138900,00	-72,65	862042,67	201900,00	-76,58	0,21	2,41
22	507785,05	232600,00	-54,19	862042,67	311500,00	-63,86	0,36	3,48



**Tabla 8.28 Momentos últimos para luces de 200 mm**

Ø40*2 Intemperie Luz 200 mm								
Tubo	Mu Ana. Elástico (N/mm)	Mu Expe. Elastico (N/mm)	Variación (%)	Mu Ana. Plastico (N/mm)	Mu Expe. Plastico (N/mm)	Variación %	flecha analitica elastica (mm)	fexperim. (mm)
11	507785,05	153400,00	-69,79	862042,67	337450,00	-60,85	0,06	2,08
12	507785,05	147700,00	-70,91	862042,67	381300,00	-55,77	0,06	1,26
13	507785,05	116750,00	-77,01	862042,67	193950,00	-77,50	0,05	2,50
14	507785,05	193150,00	-61,96	862042,67	275000,00	-68,10	0,07	3,36
15	507785,05	193050,00	-61,98	862042,67	286450,00	-66,77	0,07	3,38
16	507785,05	119500,00	-76,47	862042,67	140300,00	-83,72	0,05	4,15
17	507785,05	133250,00	-73,76	862042,67	218400,00	-74,66	0,05	2,62
18	507785,05	193250,00	-61,94	862042,67	252700,00	-70,69	0,07	3,64
19	507785,05	190600,00	-62,46	862042,67	275750,00	-68,01	0,07	3,33
20	507785,05	106400,00	-79,05	862042,67	195700,00	-77,30	0,04	2,11
21	507785,05	126400,00	-75,11	862042,67	185600,00	-78,47	0,05	3,38
22	507785,05	196350,00	-61,33	862042,67	256700,00	-70,22	0,08	3,89

## 8.7 Anexo 7: Comparación de porcentajes de diferencias en momentos últimos

Tabla 8.29 Porcentajes entre el momento último experimental y analítico para luces de 400 mm

Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Expe. Elastico (N*mm)	%	Mu Ana. Plástico (N*mm)	Mu Expe. Plástico (N*mm)	%	
1	862042,667	1068744,000	-23,9780862	1018960,000	1262297,000	-23,8809178	
2	862042,667	970789,200	-12,6149827	1018960,000	1107737,000	-8,7125108	
3	862042,667	1044537,000	-21,1699885	1018960,000	1284531,000	-26,0629465	
4	862042,667	903205,300	-4,77501114	1018960,000	1050512,000	-3,09649054	
5	862042,667	976328,300	-13,2575379	1018960,000	1100394,000	-7,99187407	
6	862042,667	972914,000	-12,861467	1018960,000	1192334,000	-17,0147994	
7	862042,667	837385,000	2,86037659	1018960,000	1035935,000	-1,66591427	
8	862042,667	354681,800	58,855656	1018960,000	635725,500	37,6103576	
9	862042,667	899119,500	-4,30104388	1018960,000	1030723,000	-1,15441234	
10	645806,857	827794,800	-28,1799335	768685,000	992214,900	-29,0795189	
11	645806,857	900851,500	-39,4924024	768685,000	1034937,000	-34,6373352	
12	645806,857	963373,100	-49,1735632	768685,000	1064441,000	-38,4755784	
13	645806,857	948373,700	-46,8509802	768685,000	1050954,000	-36,7210236	
14	645806,857	980502,000	-51,8258887	768685,000	1069257,000	-39,1021029	
15	645806,857	969494,000	-50,1213543	768685,000	1082209,000	-40,7870584	
16	645806,857	965934,300	-49,5701523	768685,000	1062457,000	-38,2174753	
17	645806,857	945986,300	-46,4813031	768685,000	1042224,000	-35,5853178	
18	645806,857	813349,600	-25,9431657	768685,000	973739,700	-26,6760376	
19	507785,045	250042,500	50,7581993	862042,667	368897,200	57,2066193	
20	507785,045	260132,600	48,7711183	862042,667	354374,900	58,8912575	
21	507785,045	294255,100	42,0512473	862042,667	382948,300	55,576642	
22	507785,045	217874,700	57,093124	862042,667	386929,900	55,1147623	
23	507785,045	228043,200	55,0906034	862042,667	344215,500	60,0697839	
24	507785,045	224938,900	55,7019447	862042,667	256883,600	70,2005933	
25	507785,045	203715,000	59,8816464	862042,667	301096,500	65,0717405	
26	507785,045	180256,500	64,5014162	862042,667	234078,300	72,8460888	
27	507785,045	133908,200	73,6289595	862042,667	165178,300	80,8387327	
28	203616,045	106423,600	47,7331955	345669,333	135582,300	60,7768793	
29	203616,045	198893,200	2,31948552	345669,333	219121,800	36,6094186	
30	203616,045	236051,100	-15,9295184	345669,333	271207,600	21,5413189	
31	203616,045	209638,900	-2,95794732	345669,333	218049,300	36,9196863	
32	203616,045	98286,860	51,7293148	345669,333	118113,300	65,8305529	
33	203616,045	142323,100	30,1022175	345669,333	149678,400	56,6989647	
34	203616,045	231480,400	-13,6847543	345669,333	280854,200	18,7506172	
35	203616,045	67712,500	66,7450077	345669,333	82799,210	76,0467007	
36	203616,045	261488,600	-28,4223944	345669,333	349645,200	-1,15019363	
PORCENTAJE			6,28422327	PORCENTAJE			16,0163669

Tabla 8.30 Porcentajes entre el momento último experimental y analítico para luces de 200 mm

Tubo	Mu Ana. Elástico (N*mm)	Mu Expe. Elastico (N*mm)	%	Mu Ana. Plástico (N*mm)	Mu Expe. Plástico (N*mm)	%	
1	862042,667	653220,000	24,2241683	1018960,000	917857,500	9,92212648	
2	862042,667	641493,000	25,5845418	1018960,000	871242,500	14,496889	
3	862042,667	687449,500	20,2534252	1018960,000	895121,000	12,1534702	
4	862042,667	537718,500	37,6227511	1018960,000	763300,000	25,0902881	
5	862042,667	504801,000	41,4412976	1018960,000	866750,000	14,9377797	
6	862042,667	731694,000	15,1209066	1018960,000	1018100,000	0,08439978	
7	862042,667	676399,500	21,5352643	1018960,000	811300,000	20,3796027	
8	862042,667	642518,000	25,4656382	1018960,000	795150,000	21,9645521	
9	862042,667	624752,000	27,5265571	1018960,000	794550,000	22,0234357	
10	645806,857	646562,000	-0,11693014	768685,000	709250,000	7,73203588	
11	645806,857	712214,500	-10,2828953	768685,000	829950,000	-7,97010479	
12	645806,857	659269,000	-2,08454629	768685,000	845400,000	-9,98003083	
13	645806,857	654223,500	-1,30327555	768685,000	826800,000	-7,56031404	
14	645806,857	654167,000	-1,2945268	768685,000	862650,000	-12,224123	
15	645806,857	716053,000	-10,877268	768685,000	881000,000	-14,6113167	
16	645806,857	546109,500	15,437643	768685,000	707600,000	7,94668818	
17	645806,857	471751,200	26,9516583	768685,000	612250,000	20,350989	
18	645806,857	563997,500	12,6677746	768685,000	704700,000	8,32395585	
19	507785,045	205349,600	59,5597385	862042,667	288600,000	66,5213787	
20	507785,045	365648,050	27,9915678	862042,667	525600,000	39,02854	
21	507785,045	278267,350	45,1997745	862042,667	442500,000	48,668434	
22	507785,045	143532,300	71,7336496	862042,667	276650,000	67,907621	
23	507785,045	202484,750	60,1239241	862042,667	407600,000	52,7169576	
24	507785,045	183054,400	63,9504153	862042,667	303750,000	64,7639251	
25	507785,045	177389,950	65,0659365	862042,667	428250,000	50,3214845	
26	507785,045	147152,350	71,0207397	862042,667	269650,000	68,7196457	
27	507785,045	152931,150	69,8826991	862042,667	266600,000	69,0734565	
28	203616,045	129481,450	36,4090142	345669,333	218100,000	36,9050191	
29	203616,045	165107,100	18,9125296	345669,333	197550,000	42,8500069	
30	203616,045	167027,800	17,9692346	345669,333	197050,000	42,9946539	
31	203616,045	84830,900	58,3378117	345669,333	169050,000	51,0948807	
32	203616,045	92374,450	54,6330201	345669,333	111150,000	67,8449925	
33	203616,045	192784,000	5,31983847	345669,333	268150,000	22,4258636	
34	203616,045	141558,250	30,477851	345669,333	221350,000	35,9648142	
35	203616,045	142490,150	30,0201758	345669,333	215100,000	37,7729005	
36	203616,045	172887,800	15,0912688	345669,333	229150,000	33,7083224	
PORCENTAJE			29,7103159	PORCENTAJE			28,6762006